

Lassi Korhonen

Vääntömomenttiavaimien kalibrointisovellus



Insinööri (AMK)

Tieto- ja viestintätekniikka

Kevät 2017



KAJAANIN
AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Tiivistelmä

Tekijä(t): Lassi Korhonen

Työn nimi: Vääntömomenttiavaimien kalibrintisovellus

Tutkintonimike: Insinööri (AMK), Tieto- ja viestintätekniikka

Asiasanat: Vääntömomentti, kalibrinti, LabVIEW

Opinnäytetyön tehtävänä oli luoda vääntömomenttiavaimien kalibrintisovellus LabVIEW-ohjelmointiympäristössä. Työ toteutettiin MIKES metrologian Kajaanin toimipisteelle. MIKES vastaa kansainvälisen SI-mittayksikköjärjestelmän toteutuksesta Suomessa ja tarjoaa yrityksille myös kalibrintipalveluja. Helmikuussa 2017 vääntömomenttiavaimien kalibrintistandardi ISO 6789 sai päivityksen uusilla vaatimuksilla, joita MIKESin vanha kalibrintisovellus ei kyennyt toteuttamaan. MIKES tarvitsi uuden sovelluksen, jonka suunnittelu ja toteutus tuli tämän opinnäytetyön tehtäväksi.

Sovellus toteutettiin LabVIEW-ohjelmointiympäristössä. Käyttäjä voi asettaa haluamansa asetukset, joita hyödynnetään kalibrintitoimenpiteessä. Sen aikana sovellus näytteistää vääntömomenttinormaanin signaalin ja muuntaa sen vääntömomenttidataksi, joka tulostetaan sovelluksen etupaneelille. Käyttäjä pystyy analysoimaan datasta merkittävät tulokset ja valikoimaan niistä haluamansa. Ohjelma luo kalibrintiasetusten ja valittujen tulosten pohjalta kalibrintitodistuksen.

Sovelluksen ohjelmien tuli olla modulaarisia sekä helposti laajennettavia, ja sovelluksen oli kyettävä käsittelemään virhetilanteita pysäyttämättä suoritustaan. Modulaarisuus ja laajennettavuus toteutettiin Event Case – State Machine -rakenteen eli tapahtumaohjatun tilakonerakenteen ja aliohjelmien avulla. Virheenkäsittelymenetelmiä testattiin jatkuvasti ohjelman luomisen aikana.

Sovellus validoitiin tarkan referenssilaitteiston käyttöön perustuvalla menetelmällä. Lisäksi sen toimivuutta on testattu ulkopuolisen testaajan avulla. Lopullinen kalibrintisovellus toimii oikein ja täyttää sille asetetut vaatimukset.

Abstract

Author(s): Lassi Korhonen

Title of the Publication: Torque wrench calibration software

Degree Title: Bachelor of Engineering, Information Technology

Keywords: Torque, calibration, LabVIEW

The purpose of the thesis was to develop a calibration software for torque wrenches in LabVIEW integrated development environment (IDE). The assignment was requested by MIKES metrology's office in Kajaani. MIKES is responsible for the realization of the SI units in Finland and it offers calibration services for the industry. In February 2017, the standard for the calibration of hand torque tools ISO 6789 had been updated with new requirements, which MIKES's old software could not fulfil. Because of that, MIKES needed a new software, the design and development of which became the subject of this thesis.

The software was developed in LabVIEW IDE. The user can configure the settings before the calibration procedure. During calibration, the software samples the signal from torque measurement standard and converts it into torque data, which is then printed on the front panel's graph. The user can then analyse the meaningful results from the data and choose, which are to be used. The software then creates the calibration certificate from the chosen results and the calibration settings.

The software's structure needed to be modular and easily expandable, and the software needed to be able to handle error situations without stopping its execution. Modularity and expandability were realised in the code by the usage of Event Case – State Machine structure and subroutines. The error handling methods were tested continuously as the software was being developed.

The software's functionality was validated by comparing its results to a known reference. It was also tested by an outside experimenter. The final calibration software worked properly and it fulfilled all the client's requirements.

Sisällys

1	JOHDANTO	3
2	TYÖN TAUSTA.....	3
2.1	SI-järjestelmä	3
2.1.1	Perus- ja johdannaisuudet	3
2.1.2	Vääntömomentti suureena	4
2.2	Vääntömomentin merkitys ja vääntömomenttiavaimet.....	5
2.3	Kalibrointi ja mittausepävarmuus.....	7
2.3.1	Mittanormaalit	7
2.3.2	Kalibrointi.....	8
2.3.3	Virhe	8
2.3.4	Mittausepävarmuus	9
2.4	ISO-standardi.....	12
2.4.1	Vääntömomenttiavaimien kalibroitistandardi ISO 6789	13
2.4.2	Standardin muutokset.....	13
3	MITTAUSYMPÄRISTÖ JA KALIBROINTIMENETELMÄN TOTEUTUS.....	15
3.1	Vääntömomenttinormaali MN06	15
3.2	Kalibroinnin menettelyt ja vaiheet.....	16
3.2.1	Kalibroinnista kerättävät tulokset	19
3.3	LabVIEW ohjelmointiympäristö.....	20
3.3.1	VI ja dataflow-tiedonsiirtomenetelmä	21
3.3.2	LabVIEWin toiminnot, rakenteet ja käsitteet sekä niiden suomennokset.....	23
4	OHJELMISTON VAATIMUKSET	25
5	OHJELMISTON TOTEUTUS.....	27
5.1	Tapahtumaohjattu tilakone	27
5.1.1	Functional Global Variable	27
5.1.2	Tapahtumarakenne.....	29
5.1.3	Tilakone	31
5.2	Vääntömomenttiavaimien kalibroitisovellus	32
5.2.1	Main-ohjelma	33
5.2.2	Analyysi-aliohjelmat	40
5.2.3	Settings-ohjelma	43
5.2.4	Results Screen -ohjelma.....	47

5.2.5	Parameters-ohjelma.....	50
5.2.6	Sensor Calibration -ohjelma.....	53
6	OHJELMISTON TESTAUS	56
6.1	Signaalin tulostuksen ja vääntömomentiksi muuntamisen testaus.....	56
6.1.1	Käytetyt laitteet	56
6.1.2	Testin vaiheet	57
6.1.3	Testin tulokset ja arviointi.....	57
6.1.4	Päätelmät	62
6.2	Analyysi-aliohjelmien toiminnan testaus ja korjaus	62
6.3	Tilakonerakenteen suorituksen lopettamisen korjaus	65
6.4	Toiminnan testaus ulkopuolisella testihenkilöllä.....	66
7	TULOSTEN TARKASTELU.....	67
8	YHTEENVETO.....	69
	LÄHTEET.....	70

1 JOHDANTO

Mittatekniikan keskus MIKES on Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n (Valtion teknillinen tutkimuskeskus) yksi tutkimusalue. MIKES on Suomen kansallinen metrologialaitos (NMI, National Metrology Institute), joka vastaa kansainvälisen SI-mittayksikköjärjestelmän toteutuksesta Suomessa ja kansallisen mittanormaalijärjestelmän kehityksestä, ylläpidosta ja valvonnasta. [1.] MIKES tarjoaa yrityksille myös laitteiden kalibroitipalveluja tilauksesta [2.]. MIKESillä on toimipisteet Espoon Otaniemessä ja Kajaanissa, ja jälkimmäinen on keskittynyt voiman, massan, vääntömomentin ja vesivirtauksen mittauslaitteiden kalibrointiin ja tutkimukseen. [3.] Tämä opinnäytetyö, vääntömomenttiavaimien kalibroitisovellus, toteutettiin Kajaanin toimipisteelle.

Vääntömomentti on vääntävän voiman kyky kiertää kappaletta eri etäisyyksillä tämän akselista: etäisyyden kasvaessa myös voiman vaikutus kasvaa. Vääntömomentin mittaaminen vääntömomenttiavaimilla on tärkeää esimerkiksi ruuvien ja mutterien kiristyksessä, jossa liian suuri momentti voi rikkoa niiden kierteitä, kun taas liian pieni voi jättää ne liian löysiksi. Tämän takia on tärkeää, että vääntömomenttiavaimien ja muiden mittalaitteiden ilmoittamat arvot vastaavat tarpeeksi tarkasti todellista suureen arvoa. Tämä varmistetaan kalibroinnilla, jossa mittalaitteen näyttämää verrataan tunnetun mittanormaalin arvoon hallituksessa ympäristössä, jossa ympäristötekijät kuten lämpötila, kosteus, värinä yms. ovat tiedossa ja kontrolloituja [4.]. Kalibroinnin tuloksista saadaan selville, kuinka paljon mittalaitteen lukemat poikkeavat mittanormaalien arvoista, jolloin se voidaan tarpeen vaatiessa virittää uudelleen.

Jotta kalibrointi olisi tekijästä ja paikasta riippumaton, kalibroititekniikoille on määritelty ISO-standardit. Vääntömomenttiavaimien kalibrointi perustuu standardiin ISO 6789, joka sisältää vaatimukset vääntömomenttiavaimien ominaisuuksille ja kalibrointimenettelylle. Vuonna 2017 standardista julkaistiin uusi versio, johon muun muassa lisättiin uusia toimenpiteitä mittausepävarmuuden selvittämiseksi. MIKESin vanhempi kalibroinnissa käytetty sovellus perustui standardiin vuodelta 2003, eikä se siksi kyennyt uuden standardin mukaisiin vaatimuksiin, mistä syystä MIKES tarvitsi uuden sovelluksen.

Opinnäytetyössä tehtävänä oli suunnitella ja toteuttaa LABVIEW-ohjelmointiympäristössä uusi sovellus vääntömomenttiavaimien kalibroinnille. Ohjelman tuli näyttää mitattu vään-

tömomentti etupaneelilla kuvaajana, kyetä analysoimaan ja poimimaan mitatuista tuloksista hyväksytyt arvot ja tulostamaan kerätyistä ja käyttäjän syöttämistä tiedoista Excel-muotoinen kalibrointitodistus. Ohjelman tuli myös kyetä tallentamaan ja lataamaan vääntömomenttiavaimien tietoja myöhempää käyttöä varten. Tavoitteena oli, että ohjelmasta tulisi helppokäyttöinen ja koodin rakenteesta helposti päivitettävä ja skaalautuva mahdollisten lisäominaisuuksien varalta.

2 TYÖN TAUSTA

2.1 SI-järjestelmä

SI (Système International d'Unités) on kansainvälisesti hyväksytty mittayksikköjärjestelmä, joka perustuu Ranskassa 1700-luvun lopulla käyttöön otettuun metrijärjestelmään. Järjestelmää on kehittänyt Kansainvälinen paino- ja mittakomitea CIPM, ja Yleinen paino- ja mittakonferenssi CGPM vahvisti sen vuonna 1960. SI-järjestelmää käytetään sekä teellisissä, teknisissä että jokapäiväisen elämän tarkoituksissa. [5, s. 2] [6.]

2.1.1 Perus- ja johdannaissuureet

SI-järjestelmä koostuu suureista. Suure on ilmiön, kappaleen tai aineen ominaisuus, jonka suuruus voidaan ilmaista lukuarvona ja referenssinä (kuten mittayksikkö, mittaussuure tai vertailuaine). SI-järjestelmä perustuu kansainvälisen suurejärjestelmän ISQ:n (International System of Quantities) seitsemään perussuureeseen ja niitä vastaaviin perusyksiköihin, jotka on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Perussuureet ja niiden SI-järjestelmän perusyksiköt [5, s. 3]

Perussuure		SI-perusyksikkö	
Nimi	Tunnus	Nimi	Tunnus
pituus	l	metri	m
massa	m	kilogramma	kg
aika	t	sekunti	s
sähkövirta	I	ampeeri	A
termodynaaminen lämpötila	T	kelvin	K
ainemäärä	n	mooli	mol
valovoima	I	kandela	cd

Perussuureita ei voi määrittellä muiden suureiden avulla, mutta niitä yhdistämällä voidaan muodostaa johdannaissuureita. Näin muodostettuna kaikkien suureiden yksiköt ovat samakantaisia (koherentteja), jolloin esimerkiksi yhtälöissä ei tarvitse ulkoa muistettavia muuntokertoimia. [5, s. 2–3.] [7, s. 15–21.]

2.1.2 Vääntömomentti suureena

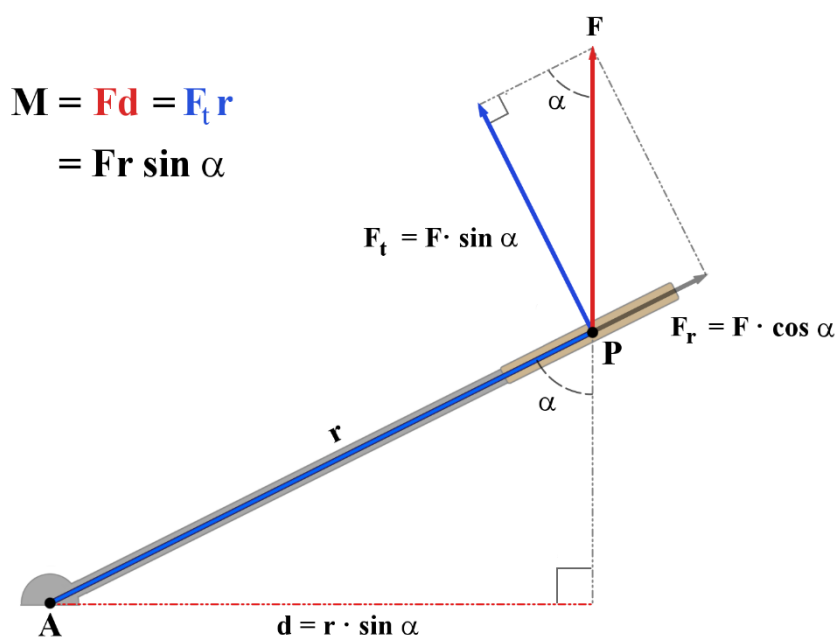
Tämän opinnäytetyön aiheeseen liittyy tärkeimpänä johdannaissuureena vääntömomentti, joka on voiman kyky kiertää kappaletta, esimerkiksi sauvaa, sen akselin ympäri. Vääntömomentin M suuruus riippuu vääntävän voiman F suuruudesta ja sen etäisyydestä l kiertymisakseliin.

$$M = F \cdot l \quad (1)$$

Vääntömomentti on vektorisuure, eli sen vaikutus riippuu voiman suunnasta. Voiman momenttiin vaikuttava komponentti on kohtisuorassa akselin ja vääntöpisteen väliseen suoraan, mikä voidaan huomioida ristitulon avulla

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}. \quad (2)$$

Kuvassa 1 on havainnollistettu, miten vääntömomentti määräytyy siihen liittyvistä suureista ristitulon mukaisesti.



Kuva 1. Vääntömomentin määräytyminen siihen liittyvistä suureista

Kuvan 1 esimerkissä sauvaa väännetään kiertymisakselin A ympäri pisteestä P . Pisteiden välinen etäisyys on r ja kokonaisvoima on F , joka ei ole kohtisuorassa sauvaa vasten. Ensimmäinen tapa laskea vääntömomentti on selvittää voiman momenttiin vaikuttava

komponentti $F_t = F \cdot \sin(\alpha)$ ja kertoa se etäisyydellä r . Toinen tapa on laskea voiman varsi $d = r \cdot \sin(\alpha)$ ja kertoa se kokonaisvoimalla F . Kummasta tahansa menetelmästä saadaan muodostettua sama ristitulon mukainen yhtälö [8, s. 206]

$$M = Fd = F_t r = Fr \cdot \sin \alpha. \quad (3)$$

Koska vääntömomentti on voiman ja pituuden tulo, sen yksikkö on newtonmetri $N \cdot m$, jota ei tule sekoittaa energian yksikön joulen $J = Nm$ kanssa [5, s. 16].

$$[M] = [F] \cdot [l] = N \cdot m = \left(kg \cdot \frac{m}{s^2} \right) \cdot m \quad (4)$$

2.2 Vääntömomentin merkitys ja vääntömomenttiavaimet

Vääntömomentin selvittäminen on tärkeää esimerkiksi muttereita kiristettäessä. Jotta mutterin tai ruuvin kierteet eivät kuluisi tai särkyisi liiallisesta kiristyksestä, mutta eivät myöskään jäisi liian löysälle, niitä tulisi kiristää vain tietyn suuruisella maksimi momentilla. Taulukossa 2 on Ruuvihankinta Oy:n ohjeet suositelluista vääntömomenteista erisuuruisille kierteille.

Taulukko 2. Suositellut vääntömomentit eri mutterien kierteille [9.]

Kierre	Kovuus				
	4.6	5.8	8.8	10.9	12.9
	N/m	N/m	N/m	N/m	N/m
M3	0,5				
M4	1,2				
M5	2,4	4,1	6,5		
M6	4,2	6,9	11		
M8	10	17	27		
M10	20	33	53	74	89
M12	34	57	91	128	154
M14	54	91	145	204	244
M16	83	139	222	313	375
M20	163	271	434	610	732
M22	219	365	584	822	986
M24	281	469	750	1050	1270
M27	406	677	1080	1520	1830
M30	555	925	1480	2080	2500
M33	748	1250	1990	2800	3360
M36	965	1610	2570	3620	4340

Oikean momentin tuottamiseen on kehitetty vääntömomenttiavaimia, joilla voidaan kiristämisen lisäksi saada tarkkoja vääntömomenttiarvoja toisin kuin tavallisilla avaimilla. Vääntömomenttiavaimilla on erilaisia toimintaperiaatteita: ne voivat ilmaista momentin mekaanisella mitta-asteikolla tai sähköisesti digitaalisella näytöllä, ja jotkut ilmaisevat asetetun arvon saavuttamisen myös äänimerkillä ja/tai haptisella palautteella (kuten värinällä tai mekaanisella laukaisulla). Kuvassa 2 on esimerkki sähköisellä näytöllä varustetusta vääntömomenttiavaimesta IZO-D-30, joka ilmaisee asetetun vääntömomentin saavuttamisen värinällä. [10.]



Kuva 2. Vääntömomenttiavain Bahco IZO-D-30 [11.]

2.3 Kalibrointi ja mittausepävarmuus

Taulukon 2 mukaisten arvojen kohdalla voidaan esittää kysymys, kuinka tarkasti ne ovat saavutettavissa. On ilmeistä, että asia riippuu vääntömomenttiavaimen kunnosta: ikä ja kuluminen käytön ja viritysten johdosta vaikuttavat avaimen toimintaan ja sen ilmaisemiin arvoihin. Käyttäjä tietää vain sen lukuarvon, jonka mittalaite ilmaisee tai näyttää, mutta ei voi olla aina täysin varma tämän totuudenmukaisuudesta, mikäli sen oikeanlaista toimintaa ei ole varmistettu [12, s. 1].

Vääntömomenttiavain on paitsi kiristykseen tarkoitettu työkalu myös mittalaite. Sen tarkkuutta voidaan tutkia vertaamalla sillä saatuja tuloksia tarkempaan referenssilaitteeseen. Tätä vertaustoimenpidettä kutsutaan kalibroinniksi, jonka tuloksista saadaan mittalaitteen virhe, eli poikkeama referenssiarvosta, ja mittausepävarmuus, joka kuvaa toimenpiteen luotettavuutta. Kalibrointiin tarkoitettuja referenssilaitteita kutsutaan mittanormaaleiksi.

2.3.1 Mittanormaalit

Mittanormaali on suureen määritelmän realisaatio, jolla on ilmoitettu suureen arvo ja siihen liittyvä mittausepävarmuus [7, s. 51]. Niitä käytetään referenssinä kalibroinnissa. Mittanormaalit voidaan jakaa primaari-, sekundaari- ja käyttönormaaleihin tai kansainvälisiin ja kansallisiin mittanormaaleihin.

Primaarinormaalit on toteutettu (ja kalibroidaan) referenssimenettelyllä, jossa mittaustulos saadaan ilman yhteyttä saman lajin suureen mittanormaaliin, tai sopimuspohjaisena rakenteena (artefaktina). Esimerkiksi nykyiset perussuureiden yksiköt perustuvat luonnonilmiöihin, lukuun ottamatta kilogrammaa, joka edelleen perustuu sovittuun prototyyppiin. Sekundaarinormaalit voidaan kalibroida niitä vastaavien primaarinormaalien avulla, ja käyttönormaalit taas vastaavien sekundaarinormaalien avulla. Primaari- ja sekundaarinormaaleja ei käytetä sijaintilaboratorioidensa ulkopuolella tai muiden kuin toisten mittanormaalien kalibrointiin. Käyttönormaaleja taas käytetään referenssinä mittalaitteiden ruutiinomaisessa kalibroinnissa. [7, s. 29 ja 51–53.]

Kansainväliset mittanormaalit ovat kansainvälisesti hyväksytyjä mittanormaaleja, jotka ovat nimensä mukaan tarkoitettu kansainväliseen käyttöön. Kansalliset mittanormaalit ovat taas valtion tai talousalueen sisällä käytettäviä mittanormaaleja. Kansainväliset mit-

tanormaalit vastaavat käytöltään primaarinormaaleja ja kansalliset sekundaari- ja käytönormaaleja. Esimerkiksi Ranskassa on kilogramman kansainvälinen prototyyppi (IPK, International Prototype of the Kilogram), jonka avulla Suomelle on valmistettu oma kansallinen prototyyppi. [13.]

2.3.2 Kalibrointi

Kalibrointi on toimenpide, jossa ensin määritellyssä olosuhteessa (jossa tiedetään esimerkiksi ympäristön lämpötila, ilmankosteus ja/tai värinä) selvitetään mittanormaalien arvojen (ja niiden mittausepävarmuuksien) ja esim. mittalaitteen näyttämien (ja taas niiden mittausepävarmuuksien) välinen yhteys. Kalibroinnin perusteella voidaan selvittää mittalaitteen tulosten poikkeama mittanormaalien arvoista ja näin päättää, tarvitseeko mittalaite viritystä. Itse kalibrointi ei kuitenkaan sisällä säätötoimenpiteitä, ja muutoksia ei tulisikaan tehdä mittalaitteeseen, mikäli sen mittausepävarmuus on sallituissa rajoissa. Viritys voi pahimmillaan nopeuttaa laitteen kulumista. [7, s. 37–38.]

Mittanormaalit kalibroidaan toistensa avulla lähtien primaarinormaaleista, muodostaen kalibrointiketjuja, jotka päättyvät lopulta mittalaitteiden kalibrointiin. Tätä ketjua kutsutaan kalibrointihierarkiaksi, jossa kaikki mittanormaalien ja mittalaitteiden tulokset juontuvat yhteisestä sovitusta referenssistä. Jokaisen kalibrointilenkin kohdalla kalibroitavan laitteen mittausepävarmuus kasvaa väistämättä johtuen kalibroinnin tekemisen mittanormaalien mittausepävarmuudesta, mikä taas vaikuttaa seuraavan lenkin mittausepävarmuuteen. Sopivalla dokumentaatiolla mahdollistetaan metrologinen jäljitettävyys, jolloin mittaustulos voidaan yhdistää aikaisempiin ketjun mittanormaaleihin tai muihin referensseihin ja niistä lopulta suureen määritelmään. [14, s. 5.] [7, s. 38–39.]

2.3.3 Virhe

Mittauksen aikana syntyy todennäköisesti virheitä johtuen monista tekijöistä, kuten mittaajasta, mittausten menetelmästä ja ympäristön vaikutuksista. Mittausvirheet voidaan jakaa kahteen tyyppiin, systemaattisiin virheisiin ja satunnaisvirheisiin. Systemaattisten virheiden vaikutuksesta mittaustulokset poikkeavat todellisesta arvosta aina saman verran samaan suuntaan tai vaihtelevat ennustettavasti. Systemaattista virhettä ei voi poistaa kokonaan, mutta jos sen arvo ja syyt tunnetaan, sitä voidaan kompensoida korjauksella, kuten korjausvakion, korjauskertoimen tai taulukon avulla. [15, s. 5.]

Satunnaisvirheet ovat ennustamattomia, sattumanvaraisia poikkeamia. Satunnaisvirheitä ei voi kompensoida systemaattisten virheiden tapaan, mutta niiden vaikutusta voidaan lieventää kasvattamalla näytteenottojen määrää ja laskemalla niiden keskiarvo. Näyttemäärän kasvaessa tarkentuu myös arvio suureen arvosta. [15, s. 5.]

Virhe on eri asia kuin mittausepävarmuus. Virhe on poikkeama mitatun ja todellisen arvon välillä. Mittausepävarmuus on mittaustuloksen epävarmuuden kvantifiointi. Virheet, joiden arvoa ei tiedetä, aiheuttavat mittausepävarmuutta. [12.]

2.3.4 Mittausepävarmuus

Mittausepävarmuus on tiedon puute siitä, kuinka tarkasti mittalaitteen tulos vastaa ”todellista” arvoa. Tunnettujen systemaattisten virheiden epätäydellinen kompensointi sekä tuntemattomien systemaattisten virheiden ja satunnaisvirheiden vaikutukset lisäävät mittausepävarmuutta. [15, s. 7] Mittausepävarmuus voidaan jakaa kahteen tyyppiin riippuen määrittyskeinosta: Tyyppi A perustuu määritellyissä olosuhteissa saatujen mitattujen arvojen tilastolliseen käsittelyyn. Tyyppi B sisältää kaikki muut menetelmät, jotka eivät kuulu tyyppin A määritelmään (esimerkiksi aiempien mittausten tulokset, valmistajan tai kalibrointitodistuksen arvot ja henkilökohtaiset kokemukset). Molemmat tyypit voivat kuvata satunnaisia ja/tai systemaattisia virheitä, mutta tavanomaisesti tyyppi A kattaa satunnaiset virheet ja tyyppi B systemaattiset virheet. [7, s. 35–36.] [15, s. 7.]

Tyyppin A mittausepävarmuuden määrittäminen

Tyyppin A tilastollisten mittausepävarmuuksien laskemisessa pyritään selvittämään, kuinka paljon mittaustulokset poikkeavat niiden keskiarvosta. Pelkkä minimi- ja maksimipoikkeaman tietäminen ei aina riitä, sillä useampien mittausten poikkeamat eivät aina asetu tasaisesti näiden ääriarvojen välille: suurissa mittaussäätimissä useampi arvo sijoittuu tyyppillisesti lähelle keskiarvoa ja harvempi ääriarvojen lähelle. Tämän vuoksi parempi tapa ilmaista tyyppin A mittaustulosten poikkeamista on laskea se kokeellisen keskihajonnan s avulla

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2}{(n-1)}}, \quad (5)$$

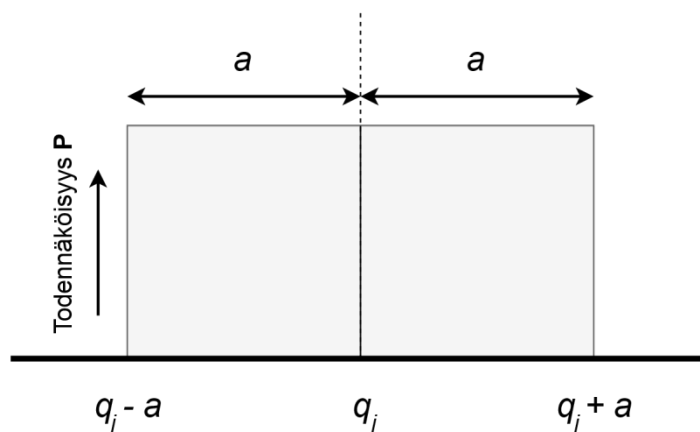
jossa q_j on j :s mittaustulos n :ään asti, \bar{q} on mittaustulosten keskiarvo ja n mittausten lukumäärä. ”Todellinen” keskihajonta saadaan selville vasta suurien (loputtomien) näytemäärien jälkeen, joten kohtuullisista näytemääristä voidaan saada vain arvio. [12, s. 5–6] [14, s. 18]

Koska keskiarvo \bar{q} on muodostettu rajallisesta näytemäärästä, se ei myöskään vastaa arvoa, joka olisi saatu loputtomasta n lukumäärästä. Tämän vuoksi keskiarvossakin esiintyy epävarmuutta, joka voidaan ilmaista keskiarvoisen standardiepävarmuuden u avulla: [14, s. 18]

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

Tyypin B mittausepävarmuuden määrittäminen

Mittausepävarmuutta voi syntyä myös asioista, joita on hankala tai mahdotonta käsitellä tilastollisilla menetelmillä. Ulkoinen häiriö voi aiheuttaa mittalaitteessa ennustamattomia, merkittäviä, kohinanomaisia häiriöitä sen tuloksissa [14, s. 11]. Mittalaitteella on myös rajallinen resoluutio, jonka määäämien portaiden välille todellinen arvo voi sijoittua. Nämä epävarmuuden lähteet voidaan luokitella tyypin B mittausepävarmuuden piikkiin ja, koska näiden virhelähteiden arvot voivat sijoittua mihin tahansa ääriarvojen välille, niistä aiheutuva epävarmuus voidaan selvittää esimerkiksi kuvan 3 todennäköisyysjakauman avulla.



Kuva 3. Suorakaiteinen todennäköisyysjakauma (kutsutaan myös tasajakaumaksi)

Yksikkö a vastaa esimerkiksi resoluution pienimmän yksikön muutosta jaettuna kahdella tai kohinan ääriarvojen väliä jaettuna kahdella. Suorakaiteisen todennäköisyysjakauman keskiarvoinen standardiepävarmuus saadaan yhtälöstä [14, s. 11]

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}}. \quad (7)$$

Todennäköisyysjakaumia on eri tilanteisiin ja käyttöympäristöihin myös muita, kuten kolmion tai U:n muotoisia, ja niille on omat standardiepävarmuutensa [14, s. 11–12].

Herkkyyskertoimet

Myös muut suureet voivat vaikuttaa mittalaitteen tuloksiin, kuten esimerkiksi ympäristön lämpötila voi aiheuttaa viivoittimessa lämpölaajenemista. Tällöin mitattu lämpötila ja sen epävarmuus on muutettava pituuden yksikköön. Suureen muutokset eivät aina vaikuta yksi yhteen mittalaitteen tuloksiin, esimerkiksi yhden celsiusasteen muutos ei tosimailmassa vastaa yhtä metrin muutosta, minkä takia on selvitettävä suureen herkkyyskerroin c_i . Sillä ilmoitetaan, kuinka paljon mittauksen tulos vaihtelee muuttujan, kuten lämpötilan, mukaan. Se voidaan selvittää osittaisderivaatan avulla, [14, s. 15]

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (8)$$

missä f on funktio, joka kuvaa mitattavan suureen riippuvuutta suureesta x_i ja muista mahdollisista suureista. Esimerkiksi jos 1,0 metrin pituisen viivoittimen pituus muuttuu lämpötilan 0,5 °C muutoksesta $6,0 \cdot 10^{-6}$ m, kun muut muuttujat pysyvät vakiona, herkkyyskerroin on silloin

$$c_{\text{lämpölaajeneminen}} = \frac{6,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{0,5 \text{ °C}} \cdot \frac{\text{m}}{\text{°C}} = 12,0 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{°C}} \quad (9)$$

Herkkyyskerroin voidaan selvittää myös käytännön testeillä, joissa yksittäistä muuttujan arvoa muutetaan samalla kun muut pidetään vakioina. Näin voi tehdä, mikäli osittaisderivaattojen muodostaminen käy monimutkaiseksi.

Yhdistetty mittausepävarmuus

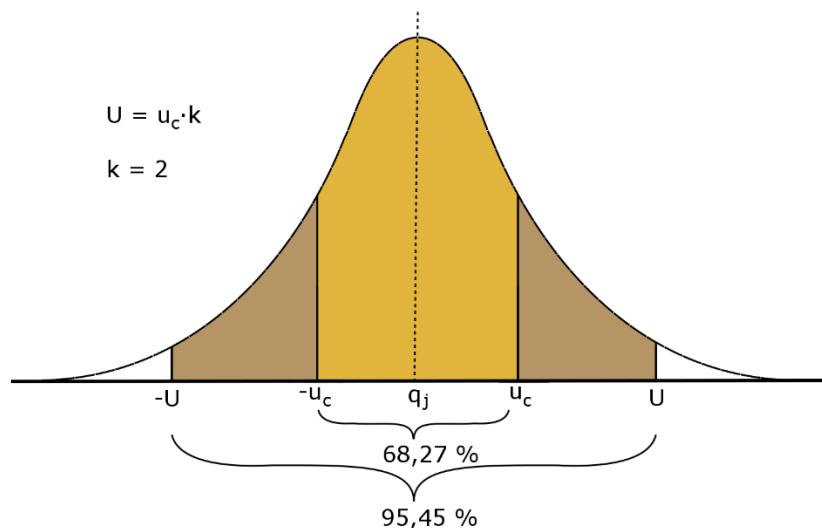
Kun eri A ja B tyyppin mittausepävarmuuksista on saatu laskettua standardiepävarmuudet ja niiden herkkyyskertoimet, yhdistetty mittausepävarmuus saadaan yhtälöstä [14, s. 16]

$$u_c = \sqrt{c_1^2 \cdot u_1^2 + c_2^2 \cdot u_2^2 + \dots + c_n^2 \cdot u_n^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 \cdot u_i^2}. \quad (10)$$

Yhdistetty mittausepävarmuus noudattaa normaalijakaumaa, mikäli mittausepävarmuuksien välillä ei ole korrelaatiota. Yhdistetty mittausepävarmuus vastaa yhtä standardipoikkeamaa, joten 68,27 % mittaustuloksista on mittausskeskiarvon $-u_c$ ja mittausskeskiarvon $+u_c$ välillä. Jotta saadaan varmistettua, että isompi määrä mittaustuloksista päätyy odotettujen rajojen sisälle, yhdistetty mittausepävarmuus kerrotaan kattavuuskertoimella k , jolloin saadaan laajennettu epävarmuus U

$$U = k \cdot u_c . \quad (11)$$

Suositeltu kattavuuskertoimen arvo on 2, joka vastaa noin 95,45 % todennäköisyyttä, että mittaustulos sijoittuu laajennetun epävarmuuden määräämälle välille keskiarvon suhteen. Kuvassa 4 on havainnollistettu kattavuuskertoimen vaikutusta laajennettuun epävarmuuteen. [14, s. 17] [12, s. 16]



Kuva 4. Normaalijakauma, jossa u_c vastaa yhtä standardipoikkeamaa ja U vastaa laajennettua epävarmuutta $u_c \cdot k$, kun $k = 2$

2.4 ISO-standardi

International Organization of Standardization (ISO) on kansainvälinen, itsenäinen, ei-hallituksen alainen organisaatio, johon kuuluu jäseniä ympäri maapalloa, yksi kustakin maasta. Organisaatiossa Suomea edustaa Suomen Standardoimisliitto SFS. [16.] ISO kehittää standardeja, joiden avulla tuotteiden valmistukselle ja kehitykselle sekä tieteellisille tutkimuksille ja mittauksille on yhteisiä vaatimuksia ja ohjeita.

Tämän työn aiheeseen liittyy vääntömomenttiavainten kalibroinnille kehitetty standardi ISO 6789 ja siihen päivityksen myötä tulleet muutokset.

2.4.1 Vääntömomenttiavaimien kalibroitistandardi ISO 6789

Vääntömomenttiavaimien kalibroinnille on kehitetty standardi ISO 6789 nimellä “ISO 6789:2017 – Assembly tools for screws and nuts. Hand torque tools”. Sen viimeisin vuoden 2017 versio on jaettu kahteen osaan: “Part 1: Requirements and methods for declaration of conformance (ISO 6789-1:2017)”, jossa käydään läpi vääntömomenttiavaimen valmistuksen ja testauksen vaatimukset, ja “Part 2: Requirements for calibration and determination of measurement uncertainty (ISO 6789-2:2017)”, jossa käydään läpi vääntömomenttiavaimien kalibroinnin vaatimukset ja mittausepävarmuuden laskeminen tulosten pohjalta.

2.4.2 Standardin muutokset

ISO 6789 sai viimeisimmän päivityksensä helmikuussa 2017, jolloin se jaettiin aiemmin mainittuihin osiin ja sai lisävaatimuksia mittausepävarmuuden määrittämiseen. Vuoden 2003 versiosta, johon edellinen MIKESin vääntömomenttiavaimien kalibrointisovellus perustui, puuttui sen jako kahteen osaan ja uusimmat mittausepävarmuuden laskennan vaatimukset.

Standardi määrittelee suhteellisen standardiepävarmuuden tyyppin I vääntömomenttiavaimille yhtälön 12 mukaan ja tyyppin II vääntömomenttiavaimille yhtälön 13 mukaan

$$w = \sqrt{\left(\frac{W_{md}}{2}\right)^2 + 2w_r^2 + w_{rep}^2 + w_{od}^2 + w_{int}^2 + w_l^2 + w_{re}^2}, \quad (12)$$

$$w = \sqrt{\left(\frac{W_{md}}{2}\right)^2 + w_r^2 + w_{rep}^2 + w_{od}^2 + w_{int}^2 + w_l^2 + w_{re}^2}. \quad (13)$$

W_{md} on kalibrointilaitteen eli mittanormaanin laajennettu epävarmuus. w_r on tyyppin B mittalaitteen resoluutiosta aiheutuva standardiepävarmuus. w_{re} on tyyppin A standardiepävar-

muus, joka syntyy vääntömomenttiavaimen tulosten toistuvuudesta aiheutuvasta variaatiosta b_{re} . w_{rep} , w_{od} , w_{int} ja w_l ovat tyyppin B standardiepävarmuuksia seuraaville variaation lähteille:

- b_{rep} , vääntömomenttilaitteen tulosten toistettavuudesta aiheutuva variaatio,
- b_{od} , vääntömomenttilaitteen vääntöpään geometrisistä vaikutuksista aiheutuva variaatio,
- b_{int} , vääntömomenttilaitteen vääntöpään ja kalibrointilaitteen rajapinnan geometrisistä vaikutuksista aiheutuva variaatio ja
- b_l , voiman kohdistamisen vaihtelusta aiheutuva variaatio.

Tämän opinnäytetyön kannalta tärkeimmät mittausepävarmuutta aiheuttavat lähteet ovat variaatiot b_{re} , b_{rep} , b_{od} , b_{int} ja b_l . Merkityksellisiä vaatimuksia, joita standardi määrittelee, ovat myös kalibrointitoimenpiteen raja-arvot, kuten mittapisteen ala- ja yläraja sekä vääntömomentin nousuajan sallitut minimi- ja maksimijat.

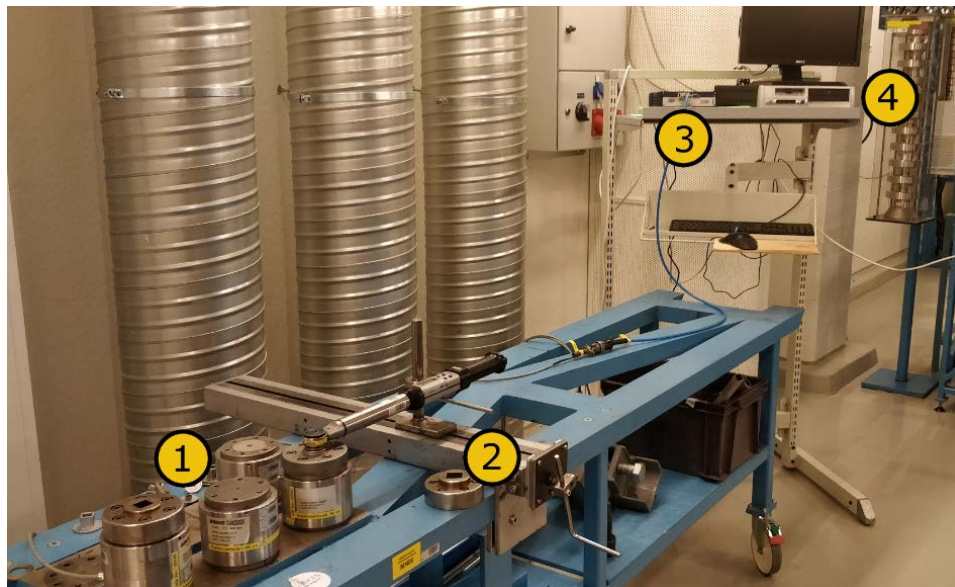
3 MITTAUSYMPÄRISTÖ JA KALIBROINTIMENETELMÄN TOTEUTUS

3.1 Vääntömomenttinormaali MN06

Vääntömomenttiavaimien kalibrointisovellus suunniteltiin käytettäväksi yhdessä vääntömomenttinormaalin MN06 kanssa, jonka toimintaperiaate pysyi samana kuin ennen standardin päivitystä. Se koostuu:

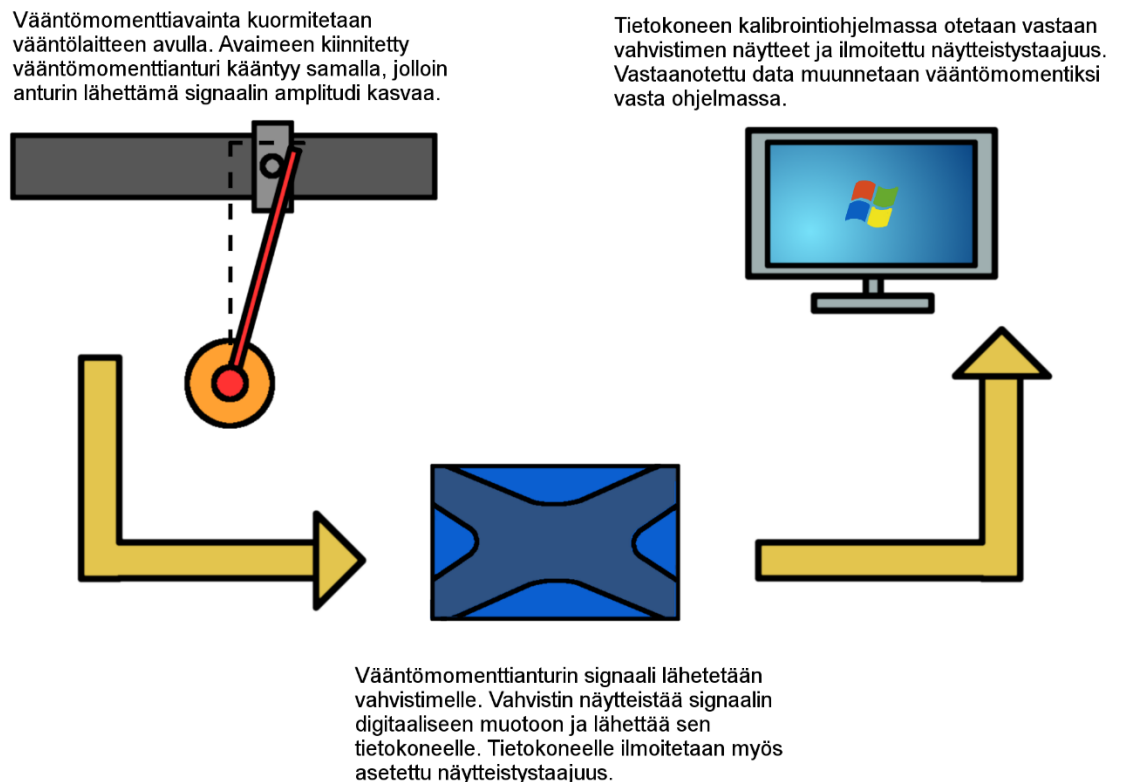
- viidestä vääntömomenttianturista, joiden nimellisarvot ovat 35, 100, 400, 1000 ja 2000 N·m
- vääntölaitteesta, jolla vääntävä voima tuotetaan kalibroitavaan vääntömomenttiavaimen kammien pyöriyksellä
- metallirungosta, johon anturit ja vääntölaite on kiinnitetty
- vahvistimesta HBM QuantumX MX238B, joka otettiin käyttöön sovelluksen päivityksen yhteydessä ja
- Microsoft Windows 7 32-bit -käyttöjärjestelmällä toimivasta tietokoneesta, jolla sovellusta ohjataan.

Kuvassa 5 on esitetty kyseinen vääntömomenttinormaali ja sen osat numeroituina.



Kuva 5. Vääntömomenttinormaali MN06 ja sen osat: 1. vääntömomenttianturit, 2. vääntölaite, 3. vahvistin ja 4. tietokone kalibrointisovelluksen suorittamiseen

Kalibroinnissa vääntömomenttiavain kiinnitetään nimellisarvoltaan sopivan kokoiseen vääntömomenttianturiin, jonka jälkeen vääntölaitteella käännetään avainta ja siihen kiinnitettyä anturia. Anturin kääntyessä sen signaalin amplitudi kasvaa. Signaali lähetetään vahvistimelle, jossa se muunnetaan digitaaliseen muotoon ja lähetetään näytteistystaajuuden kanssa tietokoneelle. Kalibroitsovellus muuntaa vastaanotetun signaalin näytteistystaajuuden avulla vääntömomenttidataksi tiedonkäsittelyä ja kalibrointitodistuksen luontia varten. Kuvassa 6 on havainnollistettu signaalin kulkua kalibrointiprosessin aikana.

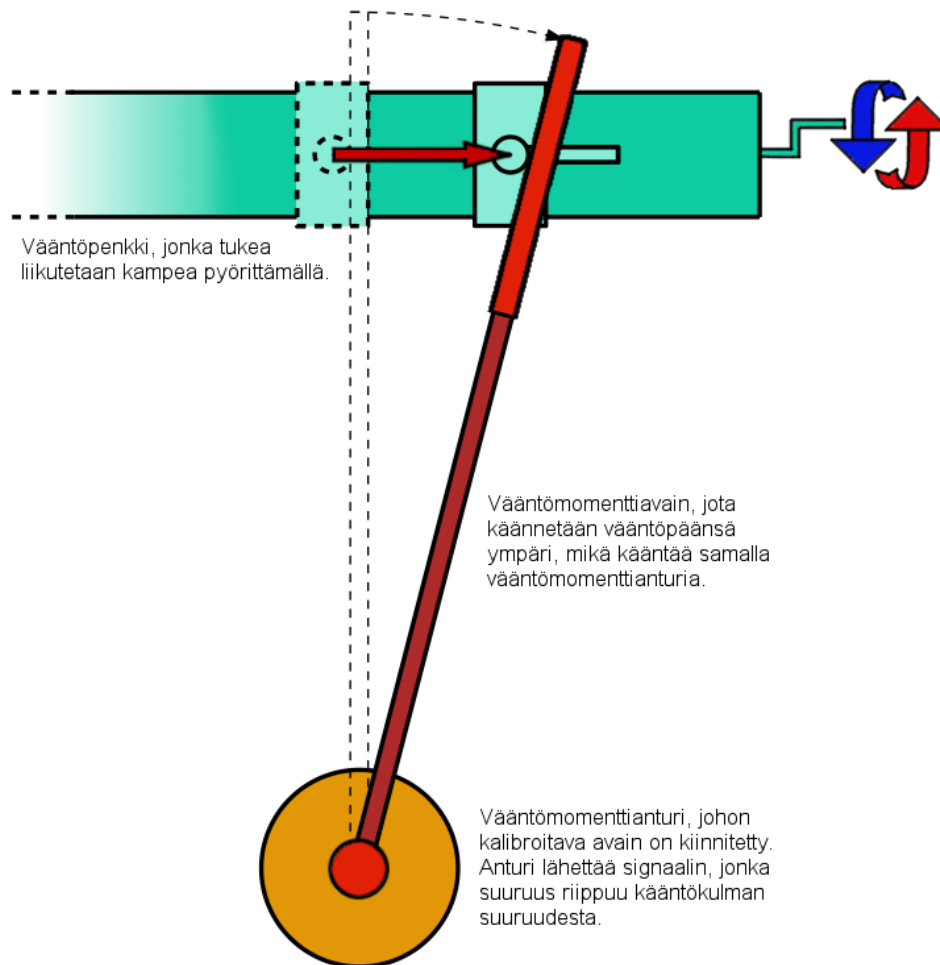


Kuva 6. Signaalin kulku vääntömomenttinormaalilla kalibroitaessa

3.2 Kalibroinnin menettelyt ja vaiheet

Kalibroitava vääntömomenttiavain mitataan vääntömomenttianturin ja vääntölaitteen avulla. Mittauksessa pyritään testaamaan avaimen käyttäytymistä, kun vääntömomenttia kasvatetaan avaimen asetettuun arvoon asti. Kuvassa 7 on havainnollistettu tätä menetelmää. Vääntömomenttiavaimelle asetetaan haluttu vääntömomenttiarvo, jonka jälkeen se kiinnitetään anturiin. Anturin nimellisarvon tulee olla suurempi kuin avaimen nimellis-

arvo. Tämän jälkeen avaimen varsi tuetaan vääntölaitteeseen siten, että sen varsi on horisontaalisessa asennossa. Vääntölaitteen tukea liikutetaan tasaisesti kampea pyörittämällä vääntösuuntaan, mikä luo vääntävän voiman, joka kääntää vääntömomenttiavainta ja samalla anturia akseliensa ympäri. Tätä toimenpidettä kutsutaan kuormitukseksi. Kun avain saavuttaa sen ilmaiseman momenttiarvon, vääntölaitteen tuki peruutetaan takaisin perusasentoon, ja kuormitus voidaan aloittaa taas alusta ja toistaa tarvittava määrä kertoja.

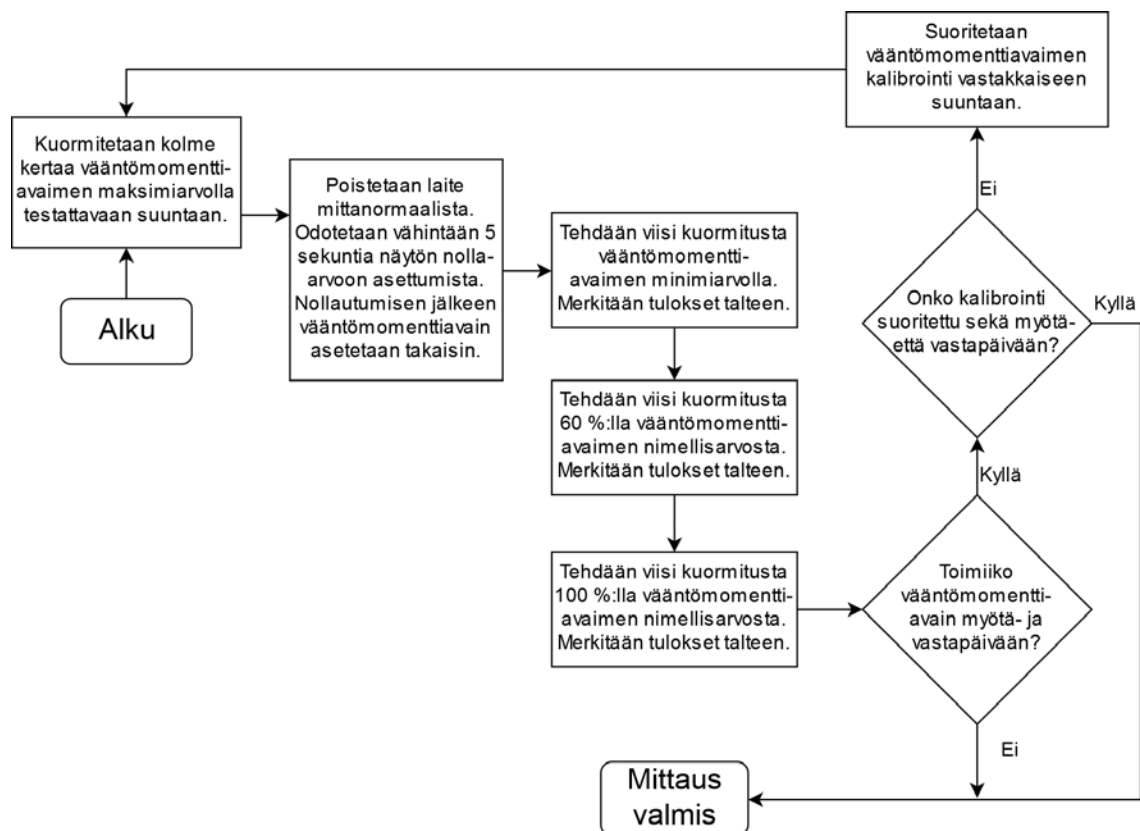


Kuva 7. Vääntömomentin mittaus anturin ja vääntölaitteen avulla.

Vääntömomenttiavaimen yhden vääntösuunnan kalibrointi koostuu kolmesta vaiheesta: esikuormitus, kalibrointi mittapisteissä ja vaihtoehtoiset testipisteillä suoritettavat testaukset. Esikuormituksessa vääntömomenttiavain asetetaan sen nimellisarvoon, ja avaimelle tehdään vähintään kolme kuormitusta ilman, että tuloksia kerätään talteen. Esikuormituksella varmistetaan, että avaimen käytös vakiintuu ennen kalibrointitulosten keräämistä.

Esikuormituksen jälkeen siirrytään kalibrointiin mittapisteissä, josta saadaan kappaleessa 2.4.2 Standardin muutokset esitetty variaatio b_{re} . Vääntömomenttiavaimelle (jos sen arvoa voidaan säätää) asetetaan tavallisesti kolme mittapistettä: minimiarvo, 60 % nimellisarvosta ja 100 % nimellisarvosta. Minimiarvo voi olla joko mittalaitteen pienin säädettävä arvo tai valmistajan määrittelemä arvo. Kullekin mittapisteelle tehdään 5 kuormitusta (säätämättömille 10), joiden tulokset kerätään talteen.

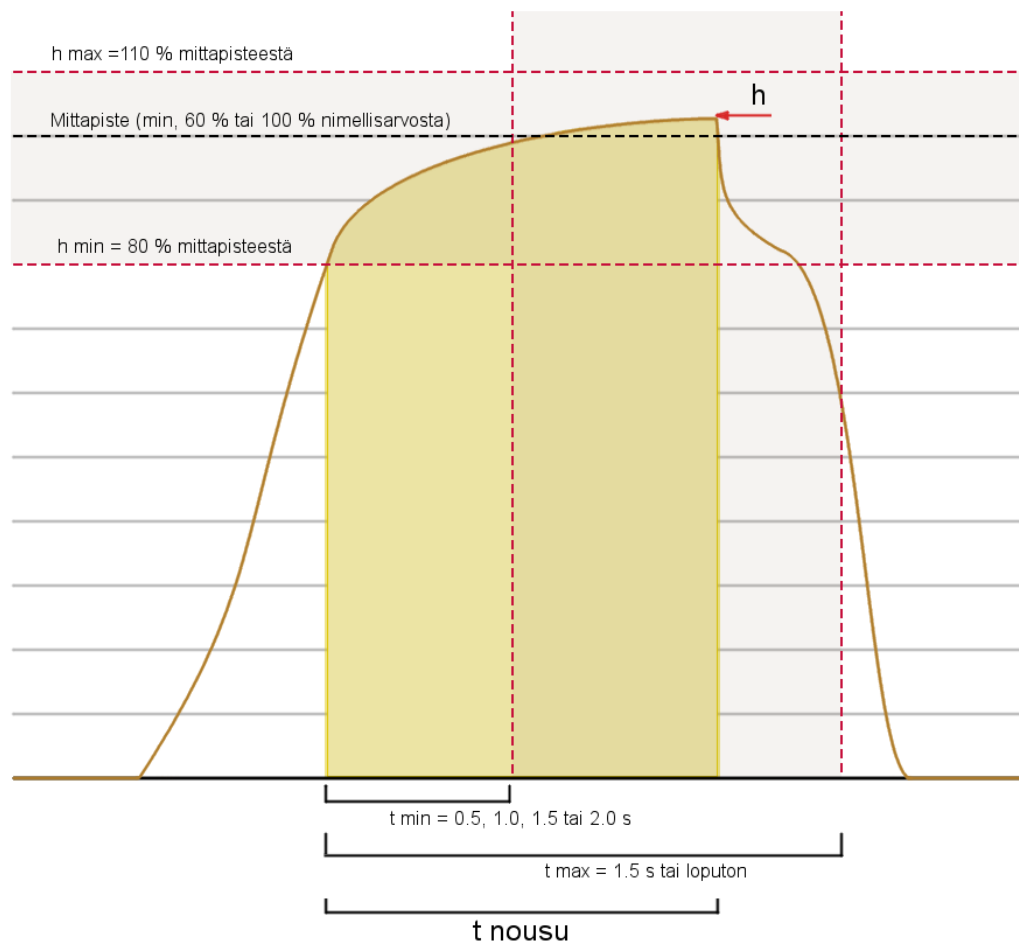
Kalibroinnin jälkeen siirrytään vääntömomenttiavaimen testaukseen testipisteillä. Testejä on 4 kappaletta, b_{rep} , b_{od} , b_{int} ja b_l , jotka on esitetty kappaleessa 2.4.2 Standardin muutokset. Testien tuloksia hyödynnetään mittausepävarmuuden laskemisessa, mutta jos edellisten kalibrointikertojen mittausepävarmuuden arvot todetaan vielä käyttökelpoisiksi, kukin testi voidaan jättää tekemättä riippumatta toisistaan. Testeissä on vaihteleva määrä testipisteitä, joihin kuuluu vaihteleva määrä kuormituksia, ja kaikki hyödyntävät normaalisti vääntömomenttiavaimen minimiarvoa kaikissa testipisteissään. Muuten testit suoritetaan samaan tapaan kuin b_{re} variaation selvittämisessä. Kuvassa 8 on yksinkertainen vuokaavio tyypin I vääntömomenttiavaimen mittaussekvenssistä. Muiden tyyppien sekvenssit noudattavat samanlaista yleistä rakennetta lieville poikkeuksilla.



Kuva 8. Tyypin I vääntömomenttiavaimen kalibrointisekvenssi

3.2.1 Kalibroinnista kerättävät tulokset

Mitta- ja testipisteiden kuormitusten tulokset kerätään talteen. Tuloksista saadaan kuvaajia, joissa ollaan kiinnostuneita niiden nousunopeuksista ja huippuarvoista. Kuvassa 9 on esimerkki yhden kuormituksen aikana saatujen tulosten kuvaajasta.



Kuva 9. Yhden kuormituskerran tuloksista saatu kuvaaja

Kuvaajan huippu h on kohta, jossa vääntömomenttiavain on saavuttanut ilmaisemansa vääntömomentin arvon, joka siihen on asetettu. Siitä nähdään, kuinka paljon vääntömomenttiavain poikkeaa odotetusta mittapisteen arvosta. Kuvaajan huippu on siis yksi kalibroinnin tuloksista, joita käytetään mittaasepävarmuuden laskemisessa.

Mikä tahansa kuormituksessa saatava tulos ei kuitenkaan kelpaa. ISO 6789 -standardi määrittelee huipun poikkeamalle ja kuvaajan nousuajalle omat vaatimuksensa. Huipun

arvo saa poiketa mittapistestä vain tietyn verran: se saa sijaita vain mittapisteen ala- ja ylärajan välillä, joiden arvot ovat normaalisti 80 % ja 110 % mittapisteen arvosta. Toinen rajoite on nousuaika (kuvaajassa t_{nousu}), joka alkaa siitä hetkestä, kun vääntömomentti saavuttaa mittapisteen alarajan ja päättyy huipun kohdalle. Nousuajan on sijoitettava minimi- ja maksimiajan välille (kuvaajassa t_{min} ja t_{max}), jotka määräytyvät vääntömomenttiavaimen tyypin ja nimellisarvon mukaan. Minimi- ja maksimiajan määräytyminen on esitetty taulukossa 3. Jos kuormitus ei täytä näitä raja-arvojen vaatimuksia, sen huippuarvoa eli poikkeamaa ei hyväksytä lopullisen mittausepävarmuuden laskemiseen. Hyväksyttäviä tuloksia on kuitenkin oltava tarvittava lukumäärä (kuten 5 tai 10 b_{re} :lle), joten epäsojivien tulosten tilalle on tehtävä uudet kuormitukset.

Taulukko 3. Nousujen minimi- ja maksiminousuajat vääntömomenttiavaimen nimellisarvon ja tyypin mukaan

	< 10 N·m	≥ 10 N·m <100 N·m	≥ 100 N·m <1000 N·m	≥ 1000 N·m
Type I, Type II A, B, C and G	0,5 – ∞ s	1,0 – ∞ s	1,5 – ∞ s	2,0 – ∞ s
Type II D, E and F	0,5 – 1,0 s	0,5 – 1,0 s	0,5 – 1,0 s	0,5 – 1,0 s

3.3 LabVIEW ohjelmointiympäristö

Päivitetty kalibrointisovellus toteutettiin LabVIEW-ohjelmointiympäristössä. LabVIEW on National Instruments (NI) -yhtiön kehittämä graafinen ohjelmointiympäristö, joka on tarkoitettu pääasiassa mittaus-, testaus- ja hallinnointiohjelmien kehitykseen. LabVIEWin vahvuuksia on sen helposti päivittyvä ja muokattava etupaneeli sekä graafinen ohjelmointiympäristö, joka tekee tiedonsiirtymisestä havainnollisempaa. LabVIEWin dataflow-tiedonsiirtomenetelmä mahdollistaa myös koodin eri osien rinnakkaisen (parallel) suorittamisen. [17, s. 1 – 2]

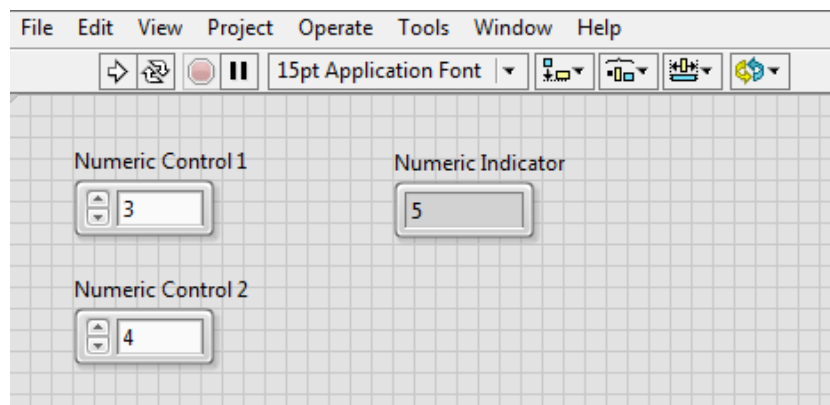
3.3.1 VI ja dataflow-tiedonsiirtomenetelmä

LabVIEWin ohjelmia kutsutaan VI:ksi (Virtual Instruments). VI rakentuu etupaneelist (front panel) ja vuokaavioikkunasta (block diagram). Etupaneeli on ohjelman käyttöliittymä, ja lopullisen exe-tiedoston ainoa osa, joka näkyy käyttäjälle. Se muodostuu kontrolleista (control), jotka toimivat painikkeina ja säätiminä tai joihin käyttäjä voi syöttää numeroarvoja tai tekstiä, ja indikaattoreista (indicator), joihin ohjelmassa käsiteltävä data tulostetaan numero- tai tekstiarvoina, merkkilamppujen valoina tai kuvaajina.

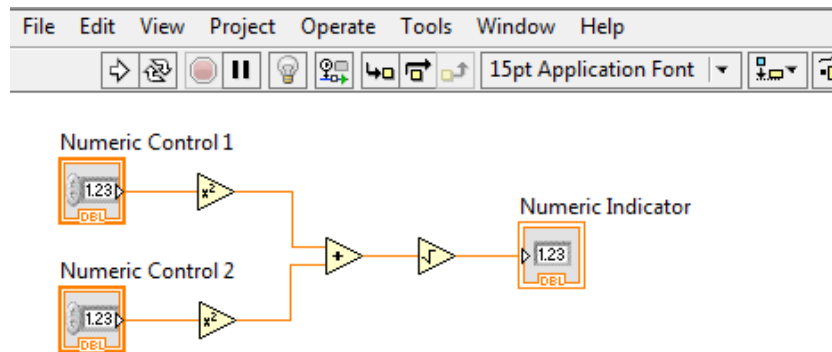
Vuokaavioikkunassa luodaan VI:n koodi. LabVIEWissä data siirretään lankoja pitkin funktioihin, joissa se käsitellään ja lähetetään langoituksella taas eteenpäin. Etupaneelin kontrolleille luodaan automaattisesti vuokaavioikkunaan terminaalit, joista käyttäjän syöttämät arvot siirretään langoilla eteenpäin. Indikaattoreiden terminaalit vastaavasti vastaanottavat lankojen datan ja tulostavat sen etupaneelille. Langat voivat olla eri tietotyyppisiä, kuten double, string, bool, waveform jne.

Tätä langoituksella luotua koodia kutsutaan datavuo (dataflow) -tiedonsiirtomenetelmäksi. Perinteisissä tekstipohjaisissa ohjelmointikielissä koodi etenee järjestelmällisesti rivi kerrallaan ja suorittaa vain yhden funktion, kuten While-silmukan, kerrallaan. [17, s. 2.] Datavuo mahdollistaa koodin rinnakkaisuuden, jossa erillisten lankojen datan siirto ja useamman funktion suoritus voidaan tehdä yhtä aikaa ja itsenäisesti toisistaan. Ainoa rajoitus on, että funktion tulee saada kaikkiin langoitettuihin tuloihin uutta dataa ennen kuin se voi suorittaa itsensä. Datavuon rinnakkaisuus mahdollisti sovelluksen ohjelmien toteutuksessa käytetyn tapahtumaohjatun tilakonerakenteen.

Kuvassa 10 on esimerkki VI:n etupaneelist ja kuvassa 11 on esimerkki saman VI:n vuokaavioikkunasta.

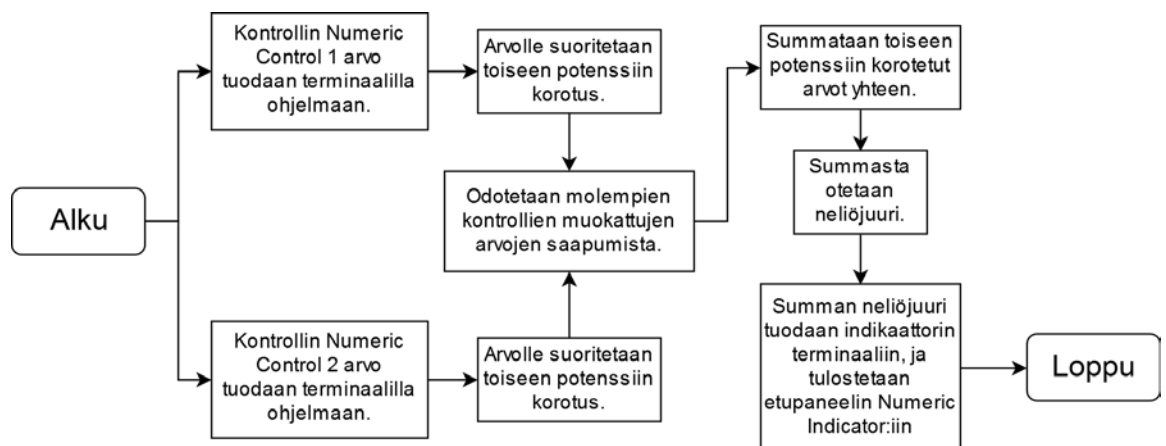


Kuva 10. Esimerkiksi muodostetun VI:n etupaneeli



Kuva 11. Esimerkiksi muodostetun VI:n vuokaavioikkuna

Kuvan 10 etupaneeliin on luotu 2 Double-tietotyyppistä kontrollia ja 1 Double-tietotyyppi-nen indikaattori. Kuvan 11 vuokaavioikkunassa kontrollien terminaalit langoitetaan omiin "Square"-funktioihin, joissa niiden arvot (3 ja 4) korotetaan toiseen potenssiin. Kumpi tahansa funktio voidaan suorittaa ensin tai, jos tietokone on moniytimellinen, yhtä aikaa toisen kanssa. Kun Add-funktio saa molempien Square-funktioiden lähtöjen datan, se voi laskea niiden arvot yhteen. Arvojen summasta otetaan neliöjuuri Square Root -funktiossa, ja saatu tulos (5) siirretään indikaattorin terminaaliin, josta se viedään etupaneelille. Kuvassa 12 on esitetty vuokaavio koodin toiminnasta.



Kuva 12. VI:n vuokaavio

3.3.2 LabVIEWin toiminnot, rakenteet ja käsitteet sekä niiden suomennokset

Tässä kappaleessa käydään läpi LabVIEWin toimintoja ja käsitteitä, joita käytetään tässä opinnäytetyössä sovelluksen kuvauksessa. Koska LabVIEW on englanninkielinen ohjelmointiympäristö, kieliasun helpottamiseksi nimityksille on pyritty käyttämään joko vakiintuneita suomenkielisiä vastineita tai antamaan omia suomennoksia. Property Node on jätetty englanninkieliseksi.

Seuraavassa luettelossa on opinnäytetyössä käytettyjen LabVIEWin käsitteiden suomennoksia. Käsitteitä ja niiden käyttöä on myös selitetty lyhyesti. Luvussa 5 Ohjelmiston toteutus selitetään myös tälle opinnäytetyölle erityisiä rakenteita ja ohjelmia, jotka on luotu muun muassa tämän kappaleen käsitteiden pohjalta ja hyödyntävät niiden suomennoksia.

- VI – ohjelma: VI:hin viitataan sanalla ohjelma tai myös aliohjelma ja pääohjelma sen roolista riippuen. VI-ohjelmilla ei ole oikeaa hierarkiaa, ja kaikki ohjelmat voivat vapaasti kutsua mitä tahansa ohjelmaa tarvittaessa. Ohjelmille voidaan asettaa tuloja ja lähtöjä kontrollien ja indikaattorien avulla (katso alla Control & Indicator).
- Driver – ajurit: Ajurit ovat ohjelmia, joilla on toteutettu ulkoisen laitteen, kuten tässä työssä vahvistimen, hallinta ja käyttö. Ajuri toimii muuten samalla tavalla kuin muut ohjelmat.
- Wire – lanka: Pääasiallinen keino siirtää dataa koodissa funktioiden ja terminaalien välillä.
- Control & Indicator – kontrolli ja indikaattori: Kontrolleilla käyttäjä voi hallita ohjelman toimintaa. Niihin voidaan kirjoittaa dataa, jota ohjelmassa tulee käyttää, tai ne voivat olla myös painettavia painikkeita ja liukusäätimiä. Indikaattoreilla taas monitoroida ohjelman toimintaa. Niihin tulostetaan ohjelmassa käsiteltyä dataa tai niihin voidaan syyttää esimerkiksi merkkivaloja. Etupaneelin kontrolleihin ja indikaattoreihin viitataan yleisesti objekteina.
- Chart/Graph – piirturinäyttö ja graafi: Piirturinäyttö ja graafi ovat indikaattoreita, joihin tulostetaan taulukoiden arvoja kuvaajina. Arvojen aikavälit riippuvat näytevälistä dt . Piirturinäyttö muistaa edelliset syötetyt arvot, ja tulostaa uusimmat kuvaajien jatkoksi. Graafi tulostaa vain sen taulukon, joka siihen on viimeisimmäksi syötetty. Se mahdollistaa käytettäväksi myös kursorit, joilla on helppo havainnollistaa kuvaajien ominaisuuksia.

- Local Variable – paikallismuuttuja: Kontrolleille ja indikaattoreille voidaan luoda paikallismuuttujia, jotka ovat joko Read- tai Write-tilassa. Read-tilassa paikallismuuttuja lähettää omistavan objektinsa dataa. Write-tilassa se tallentaa vastaanotetun datan omistavaan objektiin, korvaten vanhan datan. Paikallismuuttuja voi olla kummassakin tilassa riippumatta siitä, onko sen omistava muuttuja kontrolli tai indikaattori.
- Property Node: Etupaneelin objektien ominaisuus – kuten kaavion skaalaus tai kontrollin maksimi lukuarvo – jota voidaan muokata ohjelman suorituksen aikana. Property Nodella voidaan muuttaa myös objektin arvoa "Value (Signaling)" ominaisuudella niin, että tapahtumarakenne (katso alla Event Structure) reagoi sen muutokseen.
- Case Structure – tapausrakenne: Tapausrakenne sisältää tapauksia (case), jotka sisältävät oman koodinsa. Rakennetta kutsuttaessa sille annetaan käsky suorittaa yksi tapaus, jonka sisäinen koodi suoritetaan kerran per rakenteen kutsu.
- Event Structure – tapahtumarakenne: Tapahtumarakenne sisältää tapahtumia, jotka sisältävät oman koodinsa. Rakenne reagoi käyttäjän tekemiin etupaneelin kontrollien muutoksiin, hiiren ja/tai näppäimistön painalluksiin sekä osoittimen liikkumiseen. Se voi reagoida myös ohjelmassa Property Noden "Value (Signaling)" -arvon muutokseen. Reagoidessaan johonkin toimintoon rakenne aktivoi toiminnolle määrätyn tapahtuman, jonka koodi suoritetaan yhden kerran.
- For/While Loop – For- ja While-silmukka: For- ja While-silmukoiden sisään luotu koodi suoritetaan joko valitun määrän kertoja tai kunnes silmukka saa keskeytyskäskyn. Kun silmukan suoritus aloitetaan, se ei ota tuloihinsa uusia arvoja ennen nykyisen suorituskerran lopettamista ja uuden aloittamista.
- Shift Register – siirtorekisteri: For- ja while-silmukoissa käytettävä tiedonsiirtomenetelmä suorituskertojen välillä. Siirtorekisterit luodaan aina pareina, silmukan kummallakin puolella yksi. Oikeanpuoleinen siirtorekisteri palauttaa siihen syötetyn arvon vasemmanpuoleiseen siirtorekisteriin seuraavan suorituskerran alussa, jolloin samaa dataa voidaan käsitellä ja muokata useamman suorituskerran ajan.

4 OHJELMISTON VAATIMUKSET

Opinnäytetyön tavoitteena oli toteuttaa standardin ISO 6789:2017 -mukainen vääntömomenttiavaimien kalibroinnin mahdollistava mittaussovellus vääntömomenttinormaalille MN06. Tavoitteena mittaussovellukselle oli sen helppokäyttöisyys ja luotettava toiminta. Lisäksi sovelluksen rakenteen tuli olla helposti päivitettävä ja skaalautuva mahdollisten lisäominaisuuksien varalta. Näiden vaatimusten saavuttamiseksi ohjelmistorakenteen tuli olla modulaarinen ja hyvin dokumentoitu. Lisäksi ohjelman luotettavaan toimintaan ja virhetilanteiden käsittelyyn tuli kiinnittää huomiota.

Modulaarisuus saatiin toteutettua käyttämällä tapahtumaohjattua tilakonerakennetta sovelluksen ohjelmissa, joissa tulee käyttää etupaneelia ja suorittaa useampi kuin yksi toimenpide. Tapahtumaohjatun tilakonerakenteen etuna on vähäinen CPU-resurssin käyttö sekä helppo laajennettavuus sen tapauksia lisättäessä. Lisäksi tapausten välille on helppo luoda ketjutettuja sekvenssejä. Tapahtumaohjattua tilakonerakennetta on kuvattu tarkemmin kappaleessa 5.1 Tapahtumaohjattu tilakone.

Ohjelman modulaarisuutta, helppolukuisuutta ja testattavuutta tuli ylläpitää luomalla funktioiden kokonaisuuksista aliohjelmaa. Jokaiseen aliohjelmaan tuli sisällyttää virheenkäsittelymenettely testausta ja virhetilanteiden korjaamista varten.

Käyttäjän tuli kyetä käsittelemään ohjelman aikana kalibroinnin esitietoja, joita hyödynnetään kalibroitiprosessissa ja kalibroititodistuksen luomisessa. Esitietoihin kuuluu taulukossa 4 esitetyt tiedot.

Taulukko 4. Kalibrointitodistukseen tarvittavat tiedot jaoteltuna ryhmiin

Mittausympäristö	Momenttiavain	Tilaaja	Kalibrointianturi
Kalibrointinumero	Valmistaja	Yritys	Valmistaja
Päivänmäärä	Tyyppi	Katuosoite	Tyyppi
Mittaja	Sarjanumero	Postinumero ja -toimipaikka	Sarjanumero
Ilman lämpötila	Lempinimi	Maa	Kalibrointinumero
Ilman kosteus	Vääntöpää		Suhteellinen maksimivirhe
Ilmanpaine	Toimintaperiaate		Kalibrointilaitteiston mittausepävarmuus
	Yksikkö		
	Nimellisarvo (N·m)		
	Asteikko		
	Askelarvo		
	Asettelutarkkuus		

Käyttäjän tuli kyetä muuttamaan mittausympäristön, momenttiavaimen ja tilaajan tietoja ohjelman kautta sekä tallentamaan niitä tiedostoihin ja taas lataamaan ne ohjelmaan. Kalibrointianturien tiedot tuli tallentaa erilliseen tiedostoon, johon pystytään lisäämään tai poistamaan antureita. Tiedoston käsittelyn tuli olla salasanaalla suojattu, tiedostoformaatin CSV ja erotinmerkkinä tabulaattori.

Viimeisenä käyttäjän tuli kyetä välittämään kalibrointitiedot ja mittausdataa valmiiksi suunnitellun Excel-muotoisen kalibrointitodistuksen datavälilehdelle, josta tarvittavat tiedot voidaan välittää todistuksen muihin välilehtiin.

5 OHJELMISTON TOTEUTUS

5.1 Tapahtumaohjattu tilakone

Sovelluksen eri ohjelmien toteutuksessa hyödynnettiin tapahtumaohjattua tilakonerakennetta (Event Case – State Machine), johon viitataan vastaisuudessa tilakonerakenteena. Sen perustoiminta koostuu kolmesta osasta: 1. tapahtumarakenteesta, jota suoritetaan While-silmukan sisällä, 2. tilakoneesta (State-Machine), joka koostuu While-silmukan sisällä jatkuvasti suoritettavasta tapausrakenteesta, ja 3. Functional Global Variable (FGV) -aliohjelmasta, joka koostuu While-silmukan sisällä kerran suoritettavasta tapausrakenteesta. Tarkemmat kuvaukset rakenteiden ja ohjelman sisäisestä toiminnasta kerrotaan niiden omien otsikoidensa alla.

Tapahtumarakenne reagoi käyttäjän tekemiin toimenpiteisiin, kuten napin painalluksiin tai etupaneelin arvojen muutoksiin aktivoimalla sopivan tapahtuman. Tapahtumien tehtävänä on siirtää tilakoneelle käskyjä – kuten esimerkiksi alustus tai ohjelman suorituksen lopetus – siirtämällä ne FGV-aliohjelman avulla. FGV säilyttää viimeisimmän siihen tallennetun käskyn sen kutsumisten välillä niin pitkään, kunnes sille annetaan uusi käsky.

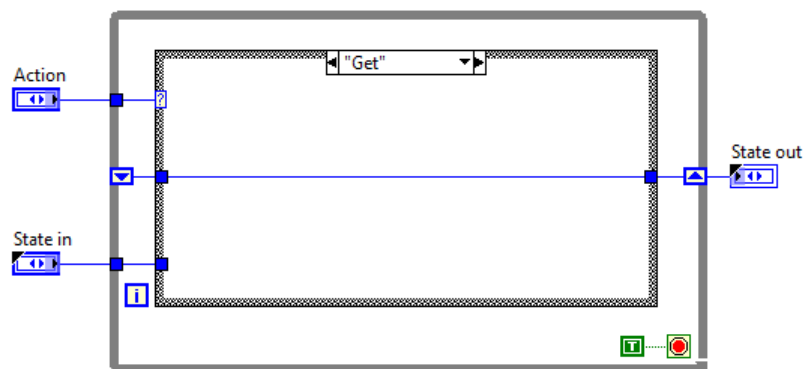
Tilakoneessa otetaan vastaan FGV:hen tallennettu käsky, jonka mukaan valitaan seuraavaksi suoritettava tapaus. Tilakoneen tapauksien tehtävänä on suorittaa ohjelman pääasiallinen koodi. Tämä koodin jako tapausrakenteen osiin tekee ohjelmasta modulaarisen: tapauksia voidaan suorittaa joko kerran tai toistuvasti, ja eri tapauksia voidaan ketjuttaa pidemmiksi kokonaisuuksiksi. Esimerkiksi ohjelman käynnistyksessä tilakone suorittaa alustustapauksen, josta siirrytään suoraan joutokäyntitapaukseen. Sitä toistetaan niin pitkään, kunnes tapahtumarakenne lähettää ohjelman lopetuskäskyn, jonka jälkeen tilakoneen ja tapausrakenteen suoritus pysäytetään ja ohjelman suoritus loppuu.

5.1.1 Functional Global Variable

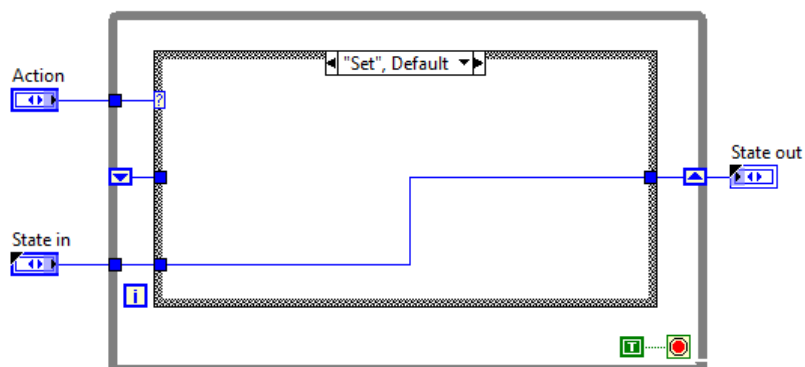
LabVIEWissa dataa siirretään normaalisti lankoja pitkin ohjelman osasta toiseen. Tämä ei kuitenkaan onnistu kahden silmukan välillä, koska silmukkaan ei voi siirtää uutta tietoa langoituksen avulla sen vielä ollessa suoritustilassa. Yksinkertainen tapa siirtää tietoa silmukoiden välillä niitä suoritettaessa on käyttää paikallismuuttujia. Usean paikallismuuttujan käyttö ja suurien datamäärien siirtäminen niillä kuormittaa kuitenkin muistia, joka voi

hidastaa ohjelman toimintaa. Lisäksi, koska tiedonsiirto niillä ei ole valvottua, usean paikallismuuttujan vastaanottaessa dataa yhtä aikaa voi syntyä kilpailutilanteita, jotka pahimmillaan aiheuttavat virheitä ohjelman toiminnassa.

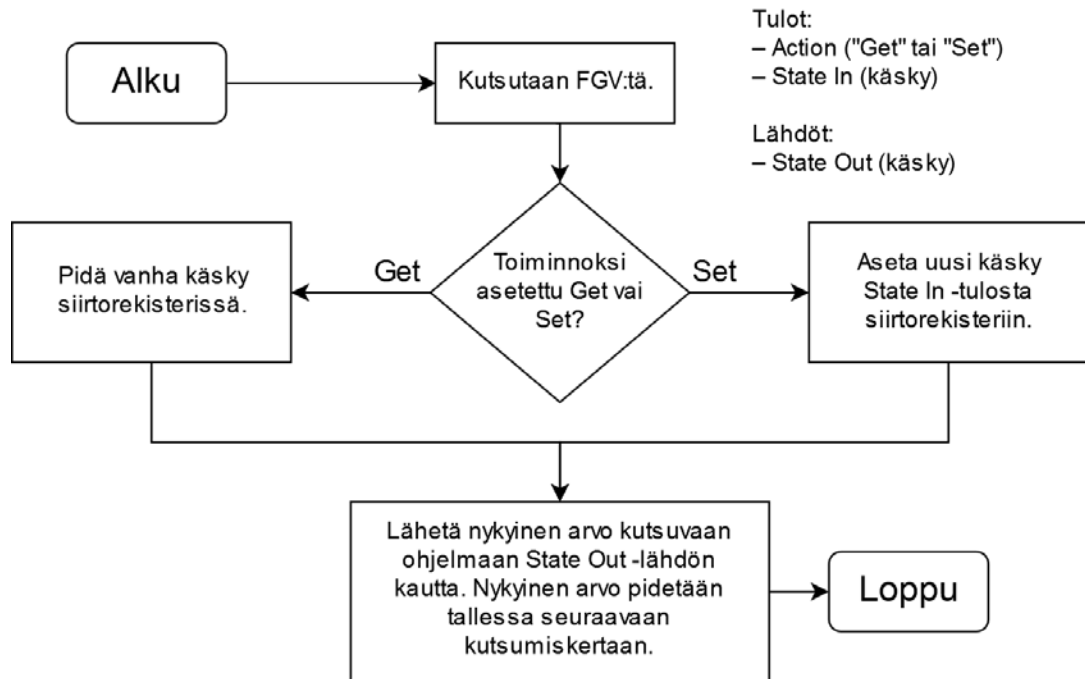
Vaihtoehtoinen tapa siirtää dataa on käyttää Functional Global Variable (Funktionaalinen Globaali Muuttuja) -aliohjelmia. Se toimii nimensä mukaan tilakonerakenteen globaalina muuttujana tapahtumarakenteen ja tilakoneen välillä. FGV koostuu While-silmukasta ja sen sisällä olevasta tapausrakenteesta, jotka suoritetaan vain yhden kerran jokaista ohjelman kutsua kohti. FGV:llä on kaksi tuloa: toimenpide (Action), johon asetetaan Get- tai Set-komento, ja tila (State), joka ottaa vastaan uuden tilakoneelle vietävän käskyn. Get-komennolla vanha käsky säilytetään FGV:n siirtorekisterissä, ja Set-komennolla uusi käsky otetaan vastaan tila-tulosta. Valittu käsky palautetaan myös kutsuvalle ohjelmalle tila-lähdön kautta. Kuvissa 13 ja 14 on esitetty FGV:n koodit Get- ja Set-tapauksissa. Kuvassa 15 on esitetty vuokaavio FGV:n toiminnasta.



Kuva 13. FGV Get-tilassa, jossa vanha arvo pidetään siirtorekisterissä



Kuva 14. FGV set-tilassa, jossa uusi käsky tallennetaan siirtorekisteriin



Kuva 15. Vuokaavio FGV:n toiminnasta

FGV on helposti ja selkeästi toteutettu tapa siirtää tietoa, ja se sisältää sekä tiedon kirjoittamisen että lukemisen saman kutsumiskerran aikana. Sen toimintaan on mahdollista lisätä muita ominaisuuksia, mikäli niitä tarvitaan ohjelman suorituksessa. Aliohjelmanä se myös ylläpitää ohjelman modulaarisuutta.

5.1.2 Tapahtumarakenne

Tapahtumarakennetta suoritetaan While-silmukassa, jossa se reagoi etupaneelin toimenpiteisiin, kuten esimerkiksi:

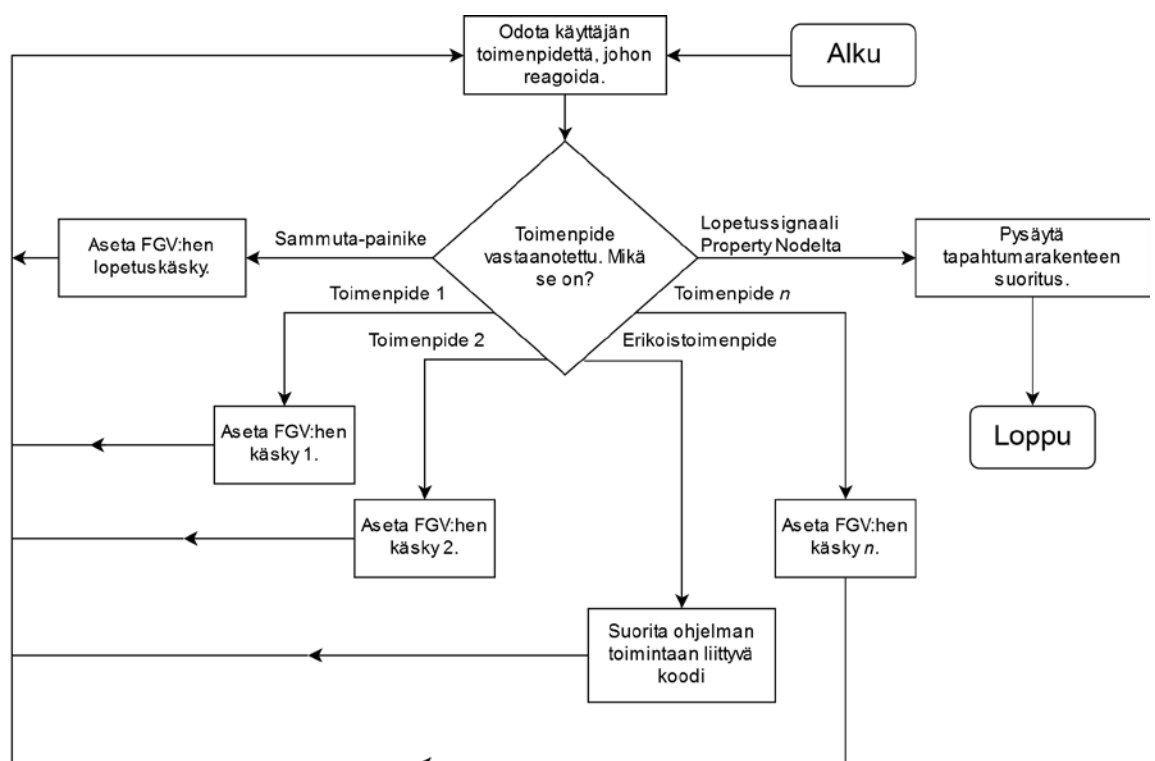
- hiiren napin painamiseen/nostamiseen osoittimen ollessa kontrollin päällä
- osoittimen liikkumiseen kontrollin päälle/päällä/päältä
- kun käyttäjä muuttaa kontrollin arvoa manuaalisesti ja/tai
- kun kontrollista luodun Property Noden "Value (Signaling)" arvoa muutetaan.

Tapahtumarakenteen reagoidessa se suorittaa yhden tapahtuman reaktiota kohti. Normaalisti tapahtumissa pelkästään asetetaan FGV:hen uusi käsky Set-komennolla ja

pääasiallinen koodi jätetään tilakoneen tehtäväksi. Tapahtumarakenteessa voidaan suorittaa myös muutakin koodia, jota on käytännöllisempää tehdä riippumatta tilakoneen toiminnasta.

Tapahtumarakenteen lopettamiseen on luotu oma kokonaisuutensa. Ohjelmaan on luotu bool-kontrolli "quit event-loop", josta on tehty Property Node "Value (Signaling)" tilakoneen pysäytystapauksen yhteyteen. Tapahtumarakenne lähettää tilakoneelle ensin lopetuskäskyn, mutta ei pysäytä omaa toimintaansa vielä. Vasta kun tilakone on suorittamassa lopetustapaustaan, se asettaa Property Nodeen uuden arvon, jonka muutokseen tapahtumarakenne reagoi ja aktivoi oman lopetustapahtuman. Tällä varmistetaan, että sekä tapahtumarakenteen että tilakoneen suoritus lopetetaan samaan aikaan. Kappaleessa 6.3 "Tilakonerakenteen suorituksen lopettamisen korjaus" kerrotaan tarkemmin, miksi tämä lopetusmenetelmä on otettu käyttöön.

Kuvassa 16 on esitetty vuokaavio tapahtumarakenteen toiminnasta esimerkin muodossa. Eri toimintoja voi olla niin monta kuin ohjelma niitä tarvitsee, mutta merkittävimmät niistä kuvan esimerkissä ovat sovelluksen suorituksen lopettamiseen liittyvät toiminnot eli Sammuta-painike ja Lopetussignaali.



Kuva 16. Vuokaavio tapahtumarakenteen toiminnasta

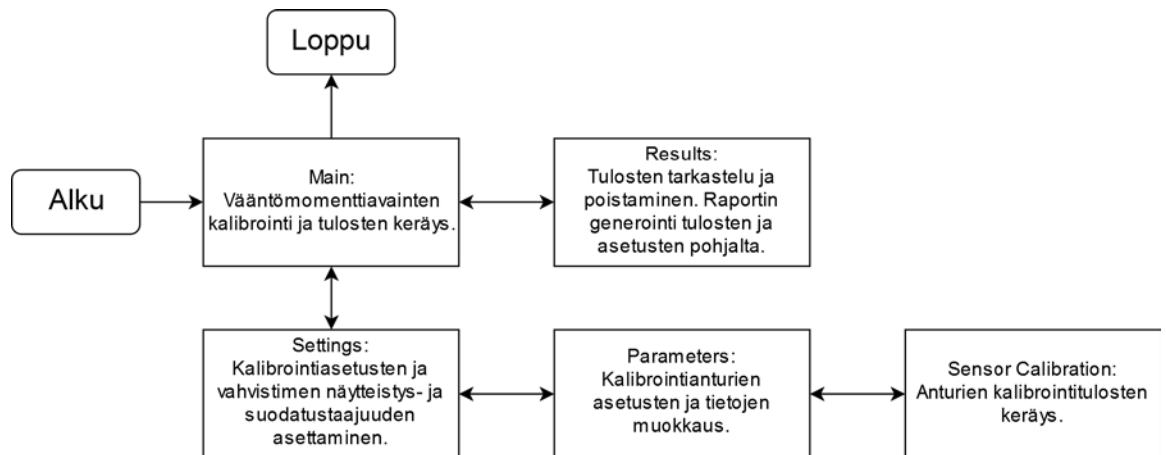
5.2 Vääntömomenttiavaimien kalibrointisovellus

Tässä opinnäytetyössä luotiin sovellus, jolla voidaan suorittaa vääntömomenttiavaimien kalibrointi. Sovellus kykenee muuttamaan vääntömomenttinormaalin kalibrointianturien signaalin vääntömomentiksi, tulostamaan sen etupaneelille kuvaajana, analysoimaan siitä olennaiset tulokset ja luomaan tuloksista ja ohjelmaan syötetyistä tiedoista kalibrointitodistuksen. Lisäksi sovelluksella voidaan suorittaa myös kalibrointianturien oma kalibrointi.

Kalibrointisovellus koostuu neljästä tilakonerakenteilla toimivasta ohjelmasta:

- Main: Pääohjelma, jossa suoritetaan vääntömomenttiavaimien kalibrointi ja kerätään sen tulokset niiden esittämistä ja analysointia varten. Täältä avataan myös Results screen -ikkuna tulosten tarkasteluun ja Settings-ikkuna kalibrointiasetusten muuttamiseen.
- Results Screen: Ohjelmassa tarkastellaan ja voidaan poistaa Main-ohjelman analyysissa kerättyjä tuloksia. Tuloksista ja kalibrointiasetuksista luodaan Excel-pohjainen kalibrointitodistus.
- Settings: Asetusikkuna, jossa muutetaan mittausympäristön, vääntömomenttiavaimen, tilaajan yms. tietoja, joita tarvitaan kalibroinnissa ja todistuksen luonnissa. Kyseiset tiedot voidaan myös tallentaa täällä tiedostoksi ja/tai ladata taas etupaneelille. Ohjelmasta voidaan siirtyä myös Parameters-ikkunaan.
- Parameters: Asetusikkuna, jossa voidaan muuttaa kalibrointianturien tietoja. Yksi olennaisimmista tiedoista on anturien kertoimet muunnoskaavalle, jolla anturien signaali muutetaan vääntömomentiksi Main-ohjelmassa. Ohjelmaan on mahdollisuus lisätä muita sovelluksen käyttöön liittyviä asetuksia, joita ei vielä tässä työssä ehditty luomaan. Täältä voidaan avata Sensor Calibration -ikkuna.
- Sensor Calibration: Aliohjelmassa suoritetaan vääntömomenttianturien kalibrointi, jonka tuloksista voidaan luoda anturien kertoimet muunnoskaavaan (katso Parameters yläpuolella) sovelluksen ulkopuolella.

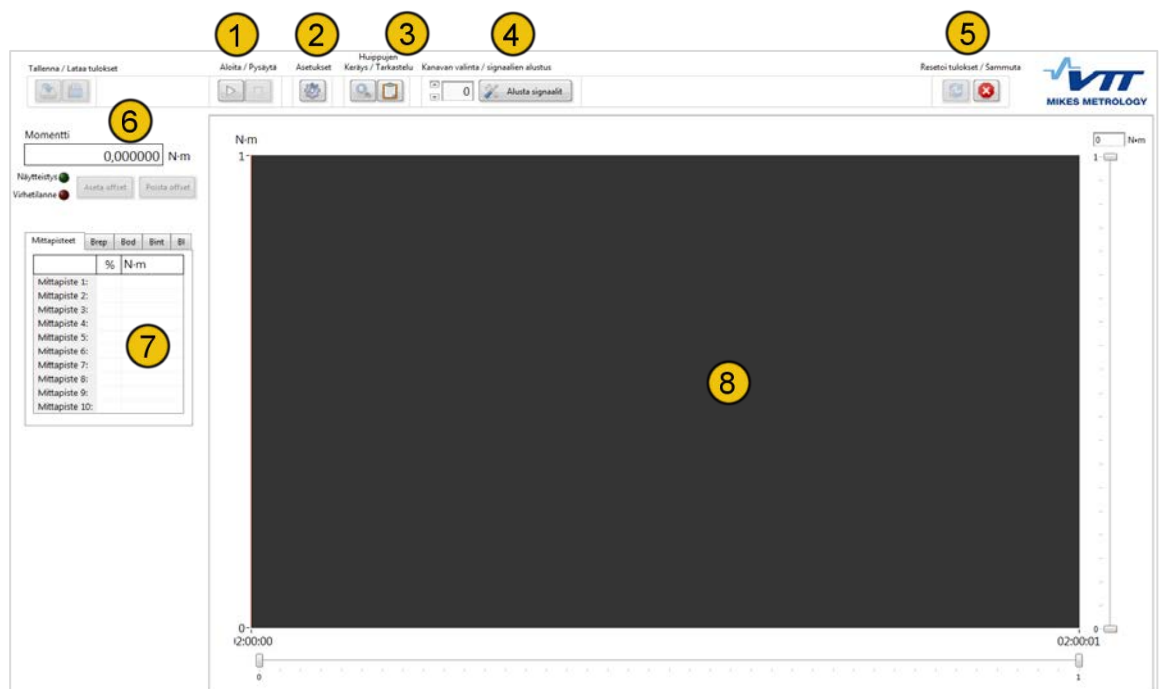
Kuvassa 18 on esitetty vuokaavio kalibrointisovelluksen rakenteesta ja siitä, miten ohjelmien välillä voidaan siirtyä. Normaalissa kalibroinnissa käyttäjä tarvitsee vain Main-, Settings- ja Results Screen -ikkunoita. Parameters ja Sensor Calibration -ikkunoita hyödynnetään tällä hetkellä vain mittanormaalin anturien kalibroinnissa.



Kuva 18. Kalibrointisovelluksen yleinen rakenne.

5.2.1 Main-ohjelma

Main on sovelluksen keskeisin ohjelma, jossa suoritetaan vääntömomenttiavaimien kalibrointi. Anturin signaalista muodostettu vääntömomentin kuvaaja esitetään etupaneelin näytöllä, jossa halutut kuormituksien tulokset voidaan analysoida ja niiden tulokset kerätä talteen.



Kuva 19. Main-ohjelman etupaneeli numeroituna

Kuvassa 19 on esitetty Main-ohjelman etupaneeli sellaisena, kuin se on sovelluksen latautumisen jälkeen. Numeroitujen objektien tehtävät ovat seuraavat:

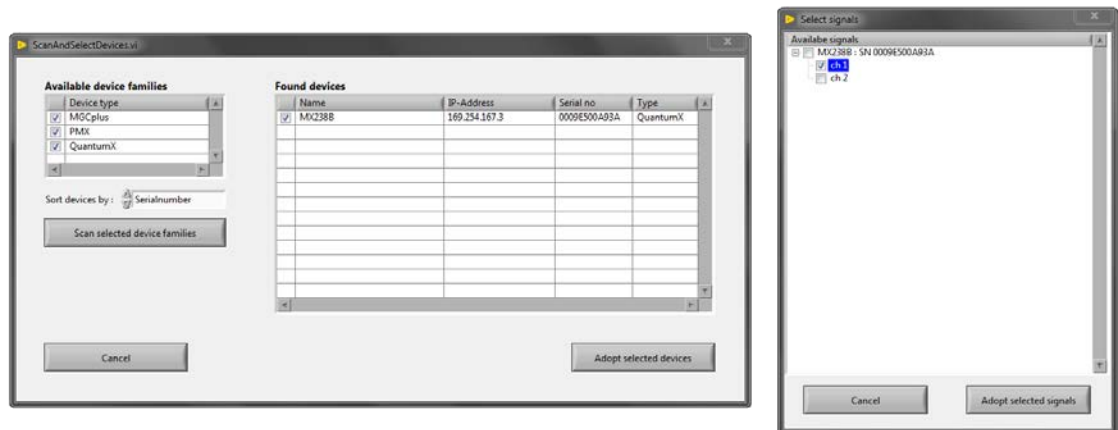
- 1) Aloita/pysäytä -painikkeet: Painamalla käynnistetään ja pysäytetään näytteistystila.
- 2) Asetukset-painike: Painamalla avataan Settings-ikkuna.
- 3) Huippujen keräys/tarkastelu -painikkeet: Keräyspainikkeella tallennetaan analyysissa hyväksytyt tulokset omiin taulukoihin. Tarkastelupainikkeella avataan Results Screen -ikkuna.
- 4) Kanavan valinta -kontrolli ja Alusta signaali -painike: Kanavan valinnalla voidaan määritellä vahvistimen näytteistettävä kanava. Alusta signaali -painikkeella vahvistin ja kanavat voidaan alustaa uudelleen.
- 5) Sammuta-painike: Painamalla pysäytetään ohjelman suoritus.
- 6) Aseta offset ja Poista offset -painikkeet, momentin hetkellinen arvo ja merkkivalot: Aseta offset -painikkeella asetetaan ohjelman laskema offset, joka vähennetään saaduista vääntömomentin arvoista. Poista offset -painikkeella offset asetetaan nollaan.

Viimeisin saatu vääntömomentin arvo tulostetaan indikaattoriin. Kun vahvistimen ajureilta saadaan dataa, Näytteistys-merkkivalo palaa vihreänä. Virhetilanne-merkkivalo palaa punaisena, jos näytteistyksessä tapahtuu virhe.

- 7) Mitta- ja testipisteiden taulukot: Settings-ikkunassa valitut mitta- ja testipisteet tulostetaan taulukoihin, jotka voidaan valita välilehdistä. Taulukoiden pisteet voidaan valita hiiren osoittimen avulla.
- 8) Graafi tai piirturinäyttö, liukusäätimet: Näytteistystilassa etupaneelille tuodaan piirturinäyttö, johon viimeisimmät näytteistetyt arvot tulostetaan. Muulloin etupaneelille tuodaan graafi, johon tulostetaan kaikki näytteistetyt arvot koko kalibroinnin ajalta. Graafista voidaan valita analysoitavia alueita hiiren osoittimen avulla.

Graafille ja piirturinäytölle on omat liukusäätimet vieressä ja alla. Niillä voidaan muuttaa kunkin näytön maksimiarvon suuruutta ja aikatazon pituutta.

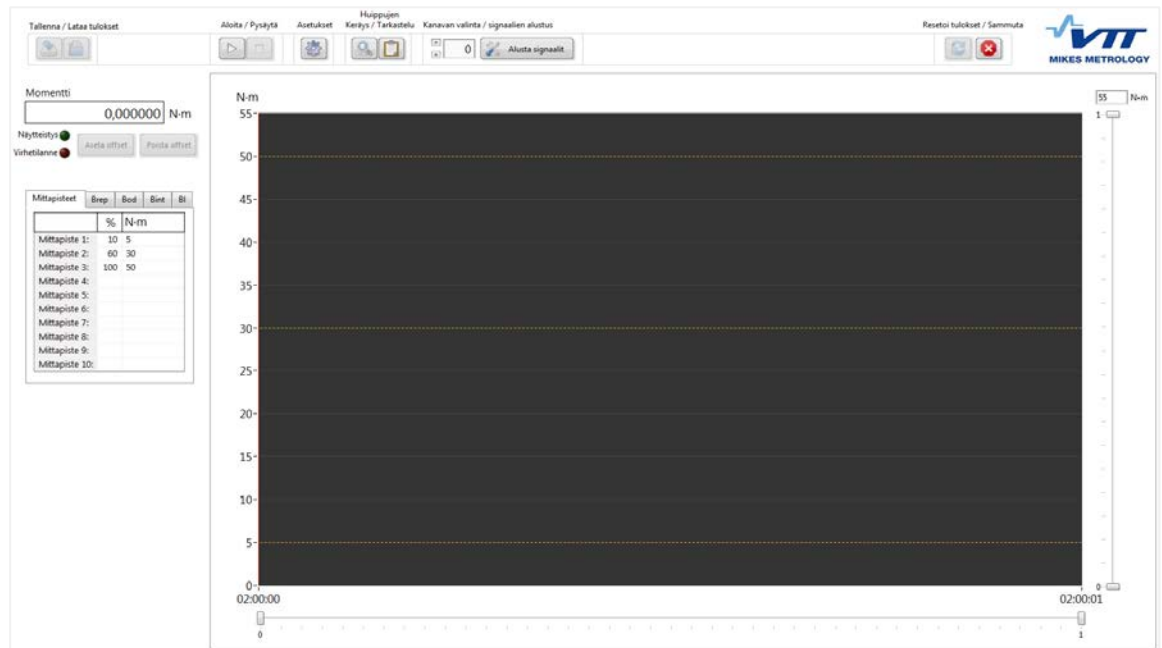
Kun sovelluksen suoritus käynnistetään, käyttäjälle avataan kuvassa 20 esitetyt kaksi vahvistimen ajurien ikkunaa, ScanAndSelectDevices vasemmalla ja Select signals oikealla. ScanAndSelectDevices avautuu ensin ja siinä käyttäjä valitsee käytettävät laitteet, tässä tapauksessa vääntömomenttinormaalin vahvistimen. Sen sulkeuduttua käyttäjälle avautuu Select signals -ikkuna, jossa valitaan vahvistimen signaalien kanavat. Mikäli laitteen tai kanavien alustus jätetään tekemättä tai ne tulee tehdä myöhemmin uudestaan, samat ikkunat voidaan avata Alusta signaali -painikkeella.



Kuva 20. Vahvistimen ja kanavan alustusikkunat

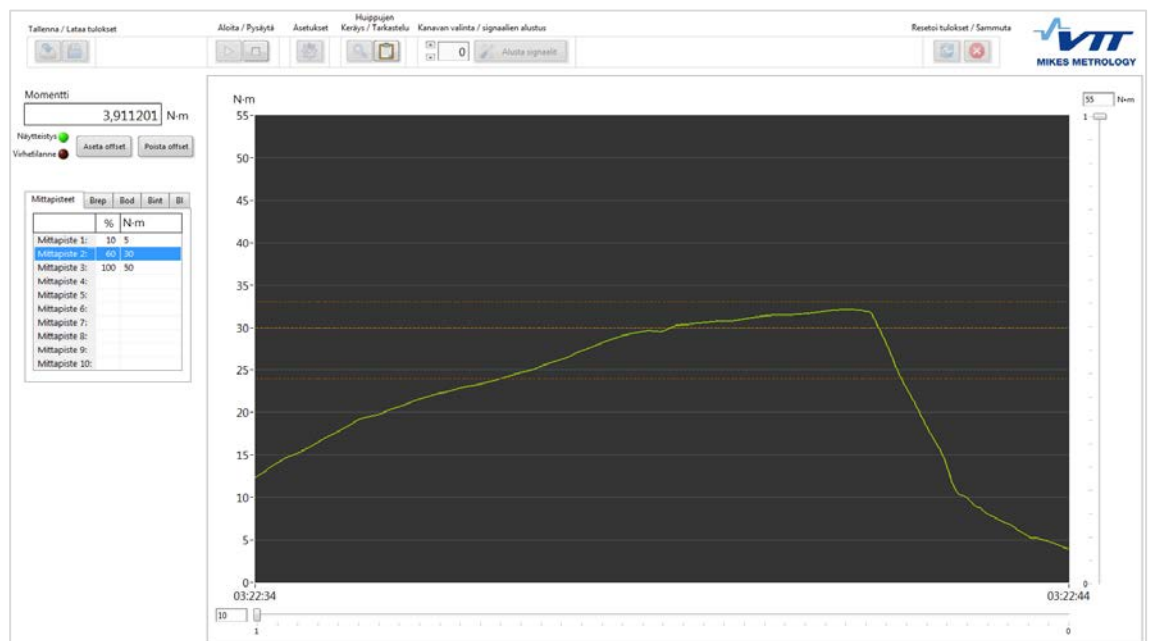
Laitteiden ja signaalien valinnan jälkeen päästään Main-ohjelman etupaneeliin, joka on avautuessaan tyhjä. Käyttäjä avaa normaalin kalibroinnin alussa Asetukset-painikkeella Settings-ikkunan, jossa kalibrointiasetuksia voidaan asettaa ja muokata. Katso kappale 5.2.3 Settings-ohjelma tarkemman kuvauksen saamiseksi kalibrointiasetuksista ja niiden muuttamisesta. Main-ohjelman suoritus keskeytetään ja sen etupaneeli lukitaan, kunnes Settings-ikkuna on suljettu.

Kun Main-ohjelmaan palataan, etupaneeli muokataan asetettujen kalibrointiasetusten mukaisesti: graafin ja piirturinäytön maksimiarvot asetetaan nimellisarvon ylärajan tasolle, asetetut mittapisteet ja valitut testipisteet tulostetaan taulukoihin ja mittapisteille luodaan vaakasuorat kursorit graafiin. Kuvassa 21 on esitetty esimerkki Main-ohjelman etupaneelistä asetusten muuttamisen jälkeen.



Kuva 21. Main-ohjelman etupaneeli kalibrointiasetusten muuttamisen jälkeen

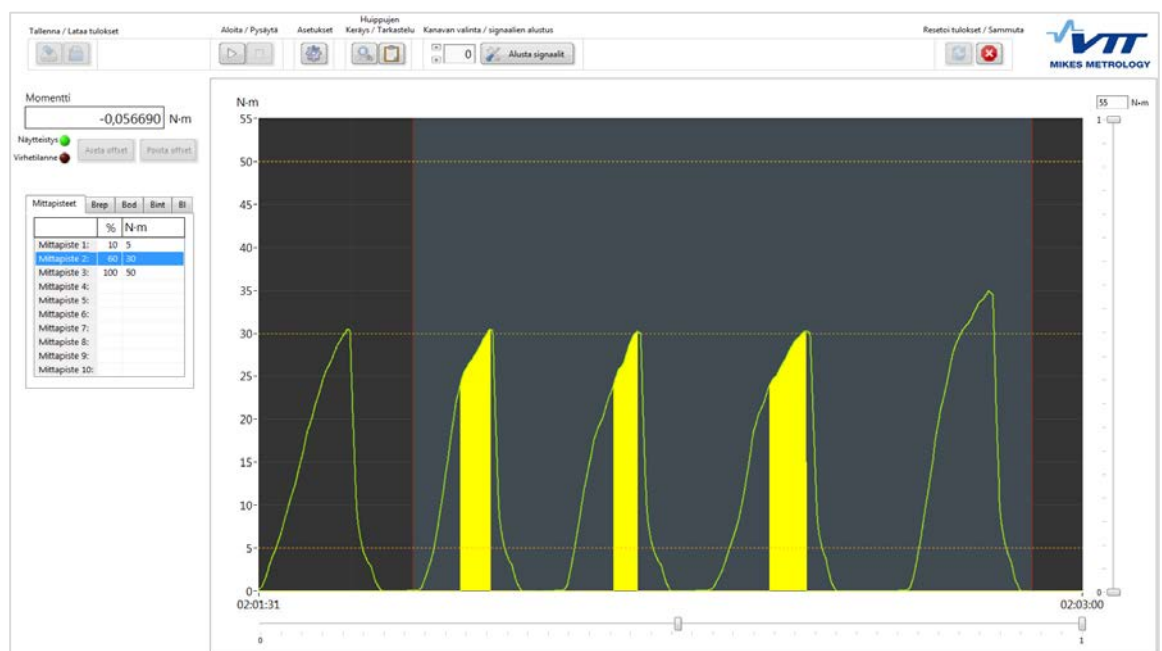
Kalibrointiasetusten jälkeen käyttäjä voi aloittaa vääntömomenttiavaimen kalibroinnin. Aloita-painiketta painamalla käynnistetään näytteistystila: vahvistin aloittaa anturin signaalin näytteistystyksen ja etupaneelin graafi korvataan piirturinäytöllä. Kuvassa 22 on havainnollistettu etupaneelia näytteistystilassa.



Kuva 22. Main-ohjelman etupaneeli näytteistystilassa 30 N·m mittapiste valittuna

Käyttäjä voi valita haluamansa mitta- tai testipisteen, joka esitetään piirturinäytöllä sen raja-arvojen kanssa. Käyttäjä suorittaa tarvittavat kuormitukset tarkasteltavalle pisteelle, jolloin vääntömomentiksi muunneltu vahvistimen signaali tulostetaan reaaliajassa piirturinäytölle. Muodostuvan käyrän muodon avulla käyttäjä voi seurata kuormituksen etene- mistä ja arvioida, ovatko ne raja-arvojen sisällä tai muuten laadultaan sopivia. Mikäli sig- naalissa esiintyy offsetia, käyttäjä voi ennen kuormituksia painaa Aseta offset -painiketta, jolloin ohjelma laskee viimeisen 20 näytteistetyyn arvon keskiarvon ja vähentää tämän seu- raavista näytteistetyistä arvoista. Offsetin korjaus voidaan nollata Poista offset -painik- keella.

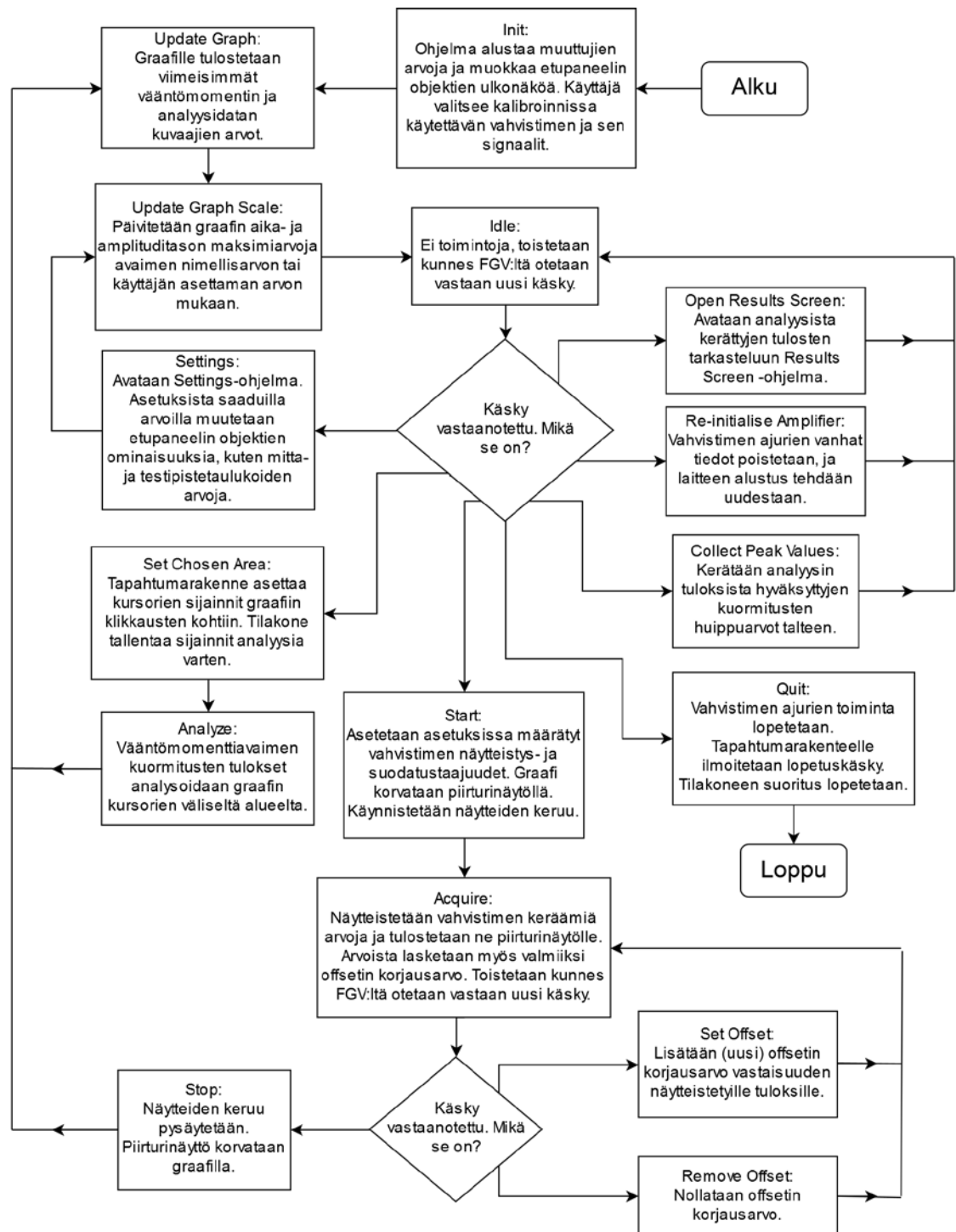
Sopivat kuormitukset tehtyään käyttäjä voi keskeyttää näytteistystilan Pysäytä-painik- keella: vahvistin lopettaa näytteistuksen ja graafi tuodaan piirturinäytön tilalle. Graafiin tu- lostetaan kaikki vääntömomentin mittaustulokset kalibroinnin ajalta, ja niille voidaan suo- rittaa analyysi halutulta aikaväliltä. Käyttäjä valitsee taulukoista halutun mitta- tai testipis- teen, johon yksittäisten kuormituskertojen tuloksia halutaan verrata. Viemällä hiiren osoi- tin graafin päälle ja painamalla hiiren painike pohjaan yhdessä ja vapauttamalla se toi- sessa kohtaa saadaan graafiin muodostettua kaksi pystysuoraa punaista kursoria. Niiden väliselle alueelle suoritetaan analyysitoimenpide valitun mitta- tai testipisteen mukaan ja hyväksytyt kuormituskertojen tulokset muuttuvat väriltään keltaisiksi. Kuvassa 23 on ha- vainnollistettu kalibrointitulosten analysointia. Katso kappale 5.2.2 Analyysi-aliohjelmat, jossa käsitellään, miten analyysi on ohjelmallisesti toteutettu.



Kuva 23. Main-ohjelman graafilla suoritettu analyysi valitulle mittapisteelle, jossa kolme neljästä valituista kuormituskertoista on tuloksiltaan hyväksytty

Kun valitun alueen tulokset on analysoitu, hyväksytyjen yksittäisten kuormituskertojen huippuarvot voidaan tallentaa 2D-taulukoihin Huippujen keräys -painikkeella. Käyttäjä voi tämän jälkeen jatkaa muiden mitta- ja testipisteiden kuormituksilla ja analysoinnilla, kunnes kalibrointi on suoritettu loppuun. Tarkastelu-painikkeella avataan Results Screen -ikkuna, jossa kerättyjä huippuarvoja voidaan tarkastella ja poistaa ja jossa voidaan luoda kalibrointitodistus. Katso kappale 5.2.4 Results Screen tarkemman kuvauksen saamiseksi tulosten käsittelystä ja todistuksen luomisesta.

Kuvassa 24 on vuokaavio Main-ohjelman tilakoneen rakenteesta. Ohjelma alkaa alustuksella, jossa alustetaan ohjelman objektien ja arvojen lisäksi vahvistin ja sen kanavat kuvan 20 ikkunoilla. Kaikki tapaukset, joilla on vaikutusta graafin ulkonäköön, ohjautuvat joko Update Graph tai Update Graph Scale -tapaukseen. Poikkeuksellisesti muihin tilakoneisiin Main-ohjelmalla on kaksi toistuvasti suoritettavaa tapausta, joutokäynti Idle ja sen lisäksi näytteistys Acquire.



Kuva 24. Vuokaavio Main-ohjelman tilakoneen rakenteesta

5.2.2 Analyysi-aliohjelmat

Analyysi on Main-ohjelman sisäinen aliohjelma, joka suoritetaan mittaustuloksista saadulle vääntömomenttidataalle käyttäjän valitsemalta aikaväliltä. Siinä pyritään selvittämään kalibroinnin kuormituksista hyväksyttävät tulokset kappaleessa 3.2.1 Kalibroinnista kerättävät tulokset kuvattujen raja-arvojen mukaan ja luomaan niistä oma kuvaajansa, josta käyttäjän on helppo itse arvioida tulosten laatua ja josta ohjelma voi myöhemmin poimia oikeat huippuarvot. Ohjelma on suunniteltu huomioimaan lievistä kohinasta tai tärinästä aiheutuvat vaihtelut kuormitustuloksissa, vaikka se ei itse eliminoi kyseisiä virheitä.

Lopullinen analyysitoimenpide on jaettu viiteen vaiheeseen, jotka on toteutettu omilla aliohjelmillaan. Vääntömomenttitaulukon käsittely tapahtuu nollaamalla kaikki arvot, jotka eivät täytä kunkin aliohjelman vaatimuksia.

Ensimmäisessä vaiheessa ohjelma hyväksyy vain arvot käyttäjän valitsemalta alueelta. Toisessa vaiheessa hyväksytään vain arvot, jotka ylittävät alarajan. Tämä eliminoi liian pienet kuormitukset ja auttaa kunkin kuormituskerran alun ja lopun löytämisessä myöhemmin.

Kolmannessa vaiheessa etsitään kuormituskertojen suurin huippuarvo ja nollataan sen jälkeiset (kuvaajalla oikeanpuoleiset) arvot alarajaan asti. Ohjelma huomioi kohinasta yms. alaspäin aiheutuvat muutokset tässä vaiheessa, eikä niiden anneta vaikuttaa tuloksiin. Neljännessä vaiheessa tarkistetaan, että kuormituksen alun ja huipun välinen aika on minimi- ja maksiminousuajan sisällä. Viides vaihe tarkistaa, että huippuarvot eivät sijoitu ylärajan yläpuolelle ja nollaa sopimattomien kuormitusten tulokset.

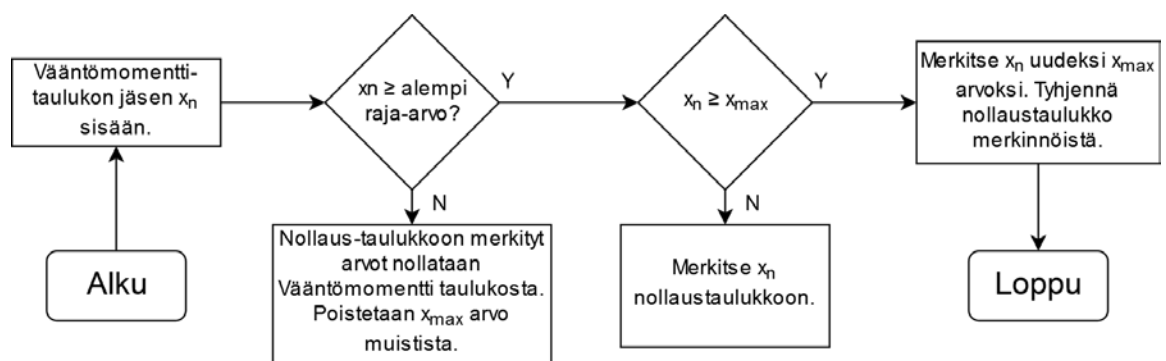
Seuraavassa luettelossa on selitetty tarkemmin kunkin aliohjelman tarkoitus ja toiminta.

1. Values Within Chosen Area: Ohjelmalla valikoidaan arvot, jotka sijoittuivat käyttäjän valitsemalle alueelle. Ohjelma ottaa vastaan muokkaamattoman vääntömomentin taulukon. Vahvistimelta saadun näytteistystaajuuden avulla ohjelma käy läpi kunkin taulukon alkion ja muuntaa sen sijainnin siinä näytteenoton ajankohdaksi. Ajankohtia verrataan valitun alueen mini- ja maksimijankohtaan: kaikkien alkioiden arvot, jotka eivät ole ajankohtien sisällä, nollataan (itse alkioita ei poisteta). Loput arvot päästetään läpi seuraavaan vaiheeseen.
2. Values Under Limit to Zero: Ohjelmalla valikoidaan arvot, jotka sijoittuivat alemman raja-arvon tasolle tai sen yläpuolelle. Ohjelma vertaa taulukon arvoja mittat tai testipisteen alarajan arvoon (normaalisti 80 % mitta-/testipisteen arvosta).

Kaikki arvot, jotka alittavat raja-arvon, nollataan. Loput arvot päästetään seuraavaan vaiheeseen.

3. Values After Peak to Zero: Ohjelmalla etsitään kuormituskertojen huippuja ja valikoidaan kuormituskerran arvot, jotka sijoittuivat alkukohdan ja huipun välille. Ohjelma tarkistaa kunkin alkion kohdalla, onko tämä suurin arvo kyseisen kuormituskerran tuloksissa. Kaikki alkiot, jotka sijoittuvat viimeisimmästä huippuarvosta eteenpäin, merkitään nollaustaulukkoon. Kun ohjelma saavuttaa kuormituskerran lopun, nollaustaulukkoon merkityt alkiot nollataan, ja ohjelma aloittaa seuraavan kuormituskerran analyysin alusta. Jäljelle jääneet arvot päästetään seuraavaan vaiheeseen.

Kuvassa 25 on vuokaavio, miten nollattavat arvot valikoidaan tämän vaiheen ohjelmalla. x_n on taulukon n :s alkio, jota analysoidaan, ja x_{\max} viimeisin kuormituksen suurin arvo.



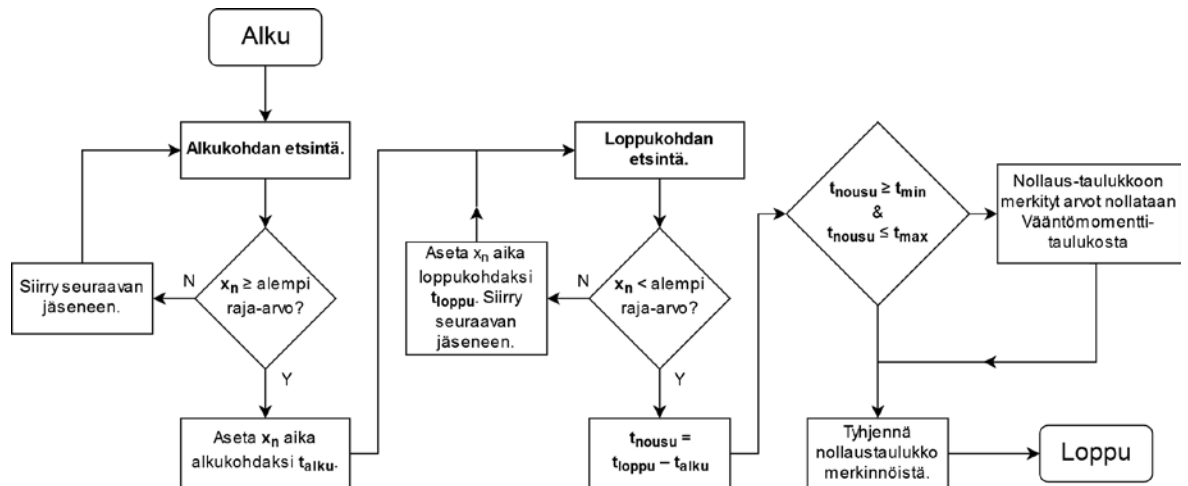
Kuva 25. Vuokaavio Values after Peak to Zero -ohjelman toiminnasta

4. Values Within Time Limits: Ohjelmalla valikoidaan kuormituskertojen tulokset, joiden alkukohdan ja huipun välinen aika sijoittuu minimi- ja maksimiousuajan välille. Samalla tavalla kuin vaiheessa 1 ohjelma käy läpi kunkin taulukon alkion ja muuntaa sen sijainnin siinä näytteenoton ajankohdaksi. Ohjelma merkitsee kuormituskerran ensimmäisen alarajan ylittävän alkion alkukohdaksi.

Ohjelma siirtyy sen jälkeen etsimään kuormituskerran huippuarvoa merkiten aina viimeisimmän alkion ajankohdan mittaustulosten loppukohdaksi. Samalla taulukon alkiot lisätään nollaustaulukkoon. Kun ohjelma saavuttaa kuormituskerran lopun, se vertaa merkittyjen tulosten alku- ja loppukohdan aikaväliä minimi- ja maksimiousuaikaan. Jos aikaväli ei sijoitu rajojen sisään, kaikki kyseisen kuormituskerran alkiot nollataan nollaustaulukon avulla. Tämän jälkeen ohjelma jatkaa seuraavan

kuormituskerran analysointiin. Jäljelle jääneet arvot päästetään seuraavaan vaiheeseen.

Kuvassa 26 on vuokaavio, miten yksittäinen kuormituskerta analysoidaan tämän vaiheen ohjelmalla. x_n on taulukon n:s alkio, jota analysoidaan.



Kuva 26. Vuokaavio Values within Time limits -ohjelman toiminnasta.

5. Peaks Over Limit to Zero: Ohjelmalla valikoidaan kuormituskertojen tulokset, joiden kaikki arvot sijoittuvat ylemmän raja-arvon tasolle tai sen alapuolelle. Ohjelma vertaa tuloksia mitta- tai testipisteen ylärajan arvoon (normaalisti 110 % mitta-/testipisteen arvosta) ja samalla tavalla kuin vaiheessa 3 ja 4 merkitsee ne nollaus-taulukkoon. Vertausta ja merkitsemistä jatketaan, kunnes saavutetaan kuormituskerran loppu. Jos yksikään kuormituskerran tuloksista ylitti ylärajan, kaikki merkityt tulokset nollataan. Muulloin tulokset päästetään läpi. Jäljelle jääneistä tuloksista saadaan lopullinen analysoitu kuvaaja.

5.2.3 Settings-ohjelma

Settings on oleellinen ohjelma kalibroinnin kannalta. Siinä asetetaan kaikki kalibrointiin liittyvät tiedot ja asetukset, jotka tallennetaan myöhemmin kalibrointitodistukseen ja/tai joita hyödynnetään kalibroinnin suorituksessa.

The screenshot shows the Settings application window with the following sections and numbered callouts:

- 1. Mittaaja ja mittaussympäristö:** Fields for Mittaaja, Ilman lämpötila, Kalibrointinumero, Ilmankosteus, Päivänmäärä, Ilmanpaine, and a Nyk. pvm. button.
- 2. Vääntömomenttiavain:** Fields for Valmistaja, Malli, Sarjanumero, Lempinimi, Tyypin valinta, Toimintaperiaate, Nimellisarvo, Asteikko, Askelarvo, Asettelutarkkuus, and Vääntötiipää.
- 3. Tavoite- ja raja-arvot:** A table for Mittapisteet with columns for % and N·m, and buttons for Lisää and Poista.
- 4. Tilaaja:** Fields for Yritys, Katuosoite, Postinumero ja -toimipaikka, and Maa.
- 5. Kalibrointianturi:** Fields for Testianturi, Valmistaja, Tyypin valinta, Sarjanumero, Kalibrointinumero, Suhteellinen maksimivirhe, and Kalibrointilaitteen mittausepävarmuus.
- 6. Testaus:** Radio buttons for Suoritettavat testit and Käytettävä arvo, with input fields for Brep, Bod, Bint, and BI.
- 7. Ohjelman ja vahvistimen asetukset:** Fields for Vahvistimen Näytteistystaajuus and Suodatustaajuus, and a Parametrien asetukset button.

At the bottom, there are buttons for Avaa, Tallenna, Reset, OK, Hyväksy, and Peruuta.

Kuva 27. Settings-ohjelman etupaneeli

Kuvassa 27 on esitetty käyttäjälle avautuva Settings-ohjelman etupaneeli, kun sitä kutsutaan Main-ohjelmasta ensimmäistä kertaa. Ohjelmassa käyttäjä kirjoittaa etupaneelin kontroleihin (kalibrointianturin tietoja lukuun ottamatta) vääntömomenttiavaimeen ja kalibrointiympäristöön liittyvät tiedot, jotka on lueteltu luvun Ohjelmiston vaatimukset taulukossa 4. Ohjelmassa valitaan myös kalibroinnissa käytettävät mittapisteet, testit, raja-arvot ja kalibrointianturi sekä asetetaan vahvistimen näytteistys- ja suodatustaajuudet. Vahvistimen tietoja lukuun ottamatta tiedot voidaan myös ladata tiedostosta tai tallentaa uudeksi tiedostoksi.

Kuvan 27 numeroituihin kohtiin kirjoitetaan seuraavat tiedot ja painikkeita käytetään seuraavasti:

- 1) Mittaaja ja mittausympäristö: Kontrolleihin kirjataan kalibroijan nimi ja mittausympäristön ominaisuudet.
- 2) Vääntömomenttiavain: Kontrolleihin kirjataan vääntömomenttiavaimen tiedot ja ominaisuudet. Ohjelma muuttaa automaattisesti tiettyjen kontrollien arvoja kun avaimen tyyppiä, nimellisarvon lukuarvoa tai käytettävän yksikön kerrannaista muutetaan.
- 3) Tavoite- ja raja-arvot: Asetetaan mittapisteiden arvot ja valitaan tehtävät testit. Mittapisteiden taulukkoon tulostetaan vääntömomenttiarvojen lisäksi niiden prosentiosuudet vääntömomenttiavaimen nimellisarvosta. Jos jotain testiä ei suoriteta, sen testipistekontrolli otetaan pois käytöstä ja tilalle otetaan kontrolli, johon kirjataan aiemman testin tulos. Jos testi suoritetaan, aiemman tuloksen kontrolli otetaan vuorostaan pois käytöstä.

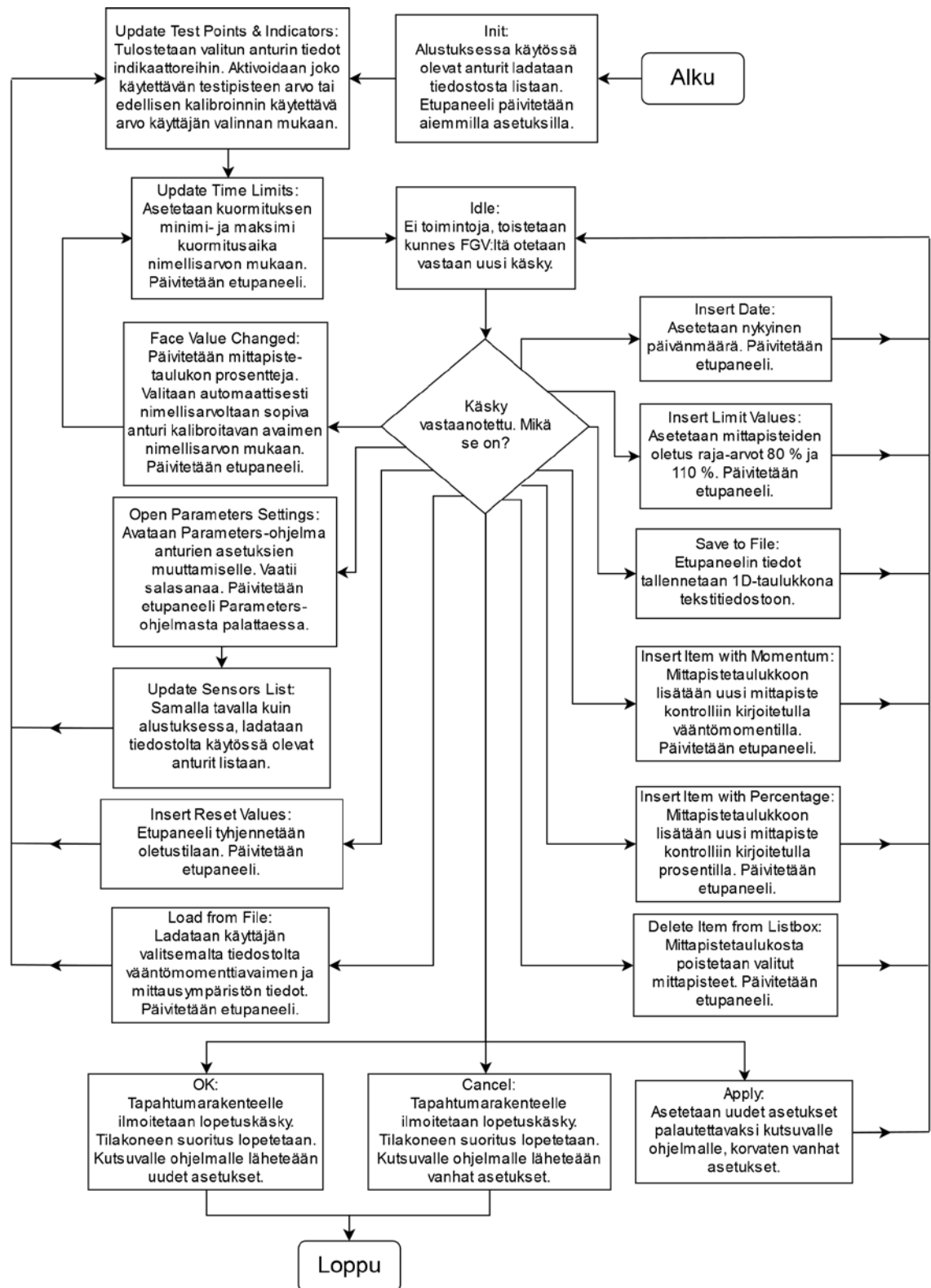
Kalibroinnin raja-arvot voidaan asettaa manuaalisesti, mutta nousuajat määräytyvät myös vääntömomenttiavaimen nimellisarvon ja tyyppin mukaan. Katso kappaleen 3.2.1 taulukko 3 tarkemman kuvauksen saamiseksi nousuaikojen määräytymisestä.

Vahvistimen näytteistys- ja suodatustaajuudet asetetaan tässä osiossa. Kohdan Parametrien asetukset -painikkeella voidaan myös avata Parameters-ohjelma, jonka suorituksen ajaksi Settings-ohjelman toiminta pysäytetään.

- 4) Tilaaja: Kontrolleihin kirjataan vääntömomenttiavaimen kalibroinnin tilaajan tiedot.
- 5) Kalibroitianturi: Käyttäjä voi valita käytettävän kalibroitianturin. Ohjelma valitsee automaattisesti sopivan anturin myös vääntömomenttiavaimen nimellisarvon lukuarvoa muutettaessa. Valitun anturin tiedot tulostetaan Settings-ohjelmassa indikaattoreihin, mutta niitä voidaan muokata vain Parameters-ohjelmassa.
- 6) Avaa-, Tallenna- ja Reset-painikkeet: Avaa-painikkeella käyttäjä voi valita aiemmin tallennetut kalibroitiasetukset tiedostosta. Tallenna-painikkeella etupaneelin tiedot tallennetaan uudeksi tiedostoksi, jonka käyttäjä voi nimetä haluamallaan tavalla. Reset-painikkeella etupaneeli tyhjennetään takaisin kuvan 27 mukaiseksi.

- 7) OK-, Hyväksy- ja Peruuta-painikkeet: OK- ja Peruuta-painikkeilla suljetaan Settings-ohjelman etupaneeli. OK lähettää viimeisimmät etupaneelin arvot Main-ohjelmalle, kun taas Peruuta palauttaa asetukset joko ennen Settings-ohjelman avaamista tai Hyväksy-painikkeen painamisen jälkeiset arvot. Hyväksy-painike asettaa etupaneelin senhetkiset tiedot Main-ohjelmalle palautettavaksi, vaikka painettaisiin Peruuta-painiketta.

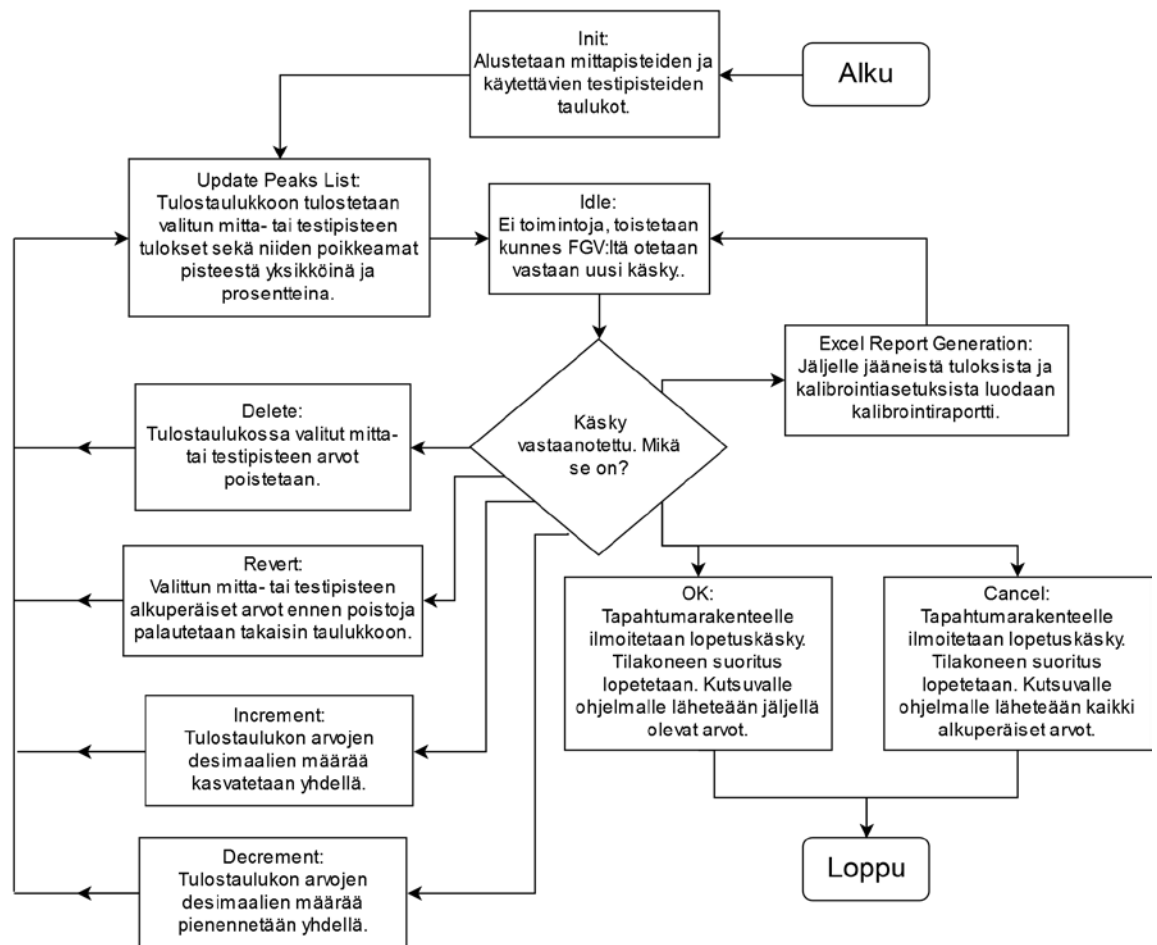
Kuvassa 28 on vuokaavio Settings-ohjelman tilakoneen rakenteesta. Update test points & indicators ja/tai Update time limits -tapauksiin siirrytään, mikäli asetusten muutoksesta etupaneelin arvoja ja ulkonäköä pitää muuttaa: testipisteitä pitää ottaa tai poistaa käytöstä, kalibrointianturin tietoja pitää päivittää tai käytettävää yksikön kerrannaista tulee muuttaa sen indikaattoreihin.



Kuva 28. Vuokaavio Settings-ohjelman tilakoneen rakenteesta

- 3) Mittapisteen tulosten keskiarvo ja poikkeamien keskiarvo yksikkönä ja prosentteina: Tulosten ja poikkeamien keskiarvot lasketaan indikaattoreihin. Poikkeaman keskiarvoilla (yksikkö ja prosentti) ei ole tekemistä keskihajonnan tai yleensä mitausepävarmuuden laskemisen kanssa, vaan ne ovat havainnollisia apuvälineitä.
- 4) Poista valitut ja Peruuta poisto -painikkeet: Kun tulosten taulukosta on valittu arvoja, ne voidaan poistaa Poista valitut -painikkeella. Niin pitkään, kun OK-painiketta ei paineta, kunkin mitta- tai testipisteen tulokset voidaan joko palauttaa erikseen Peruuta poisto -painikkeella tai kaikki arvot voidaan palauttaa, kun ohjelma suljetaan Peruuta-painikkeella.
- 5) Luo Excel todistus -painike: Ohjelma luo Excel-pohjan avulla kalibroitodistuksen, johon kerätään sen datavälilehdelle kalibroinnin tulokset ja Settings-ohjelmassa asetetut kalibroitasetukset ja anturien tiedot. Excel jäsentelee tiedot oikeisiin kohtiin todistusta tältä välilehdeltä. Käyttäjän on itse nimettävä ja tallennettava kalibroitodistus Excelissä.

Kuvassa 30 on vuokaavio Results Screen -ohjelman tilakoneen rakenteesta. Suurin osa toiminnoista vaikuttaa taulukossa ja indikaattoreissa esitettyihin arvoihin, joten ohjelma päivittää ne Update peaks list -tapauksessa muiden kuin todistuksen luonnin ja suorituksen lopettamisen yhteydessä.



Kuva 30. Vuokaavio Results Screen -ohjelman tilakoneen rakenteesta

5.2.5 Parameters-ohjelma

Parameters-ohjelmassa voidaan muuttaa kalibrointianturien tietoja ja muunnoskaavan kertoimia, joilla anturien signaali muunnetaan vääntömomentiksi Main-ohjelmassa kolmannen asteen polynomilla. Ennen ohjelman kutsumista Settings-ohjelma kysyy käyttäjältä salasanaa, joka on tallennettu erilliseen tiedostoon. Salasanalla varmistetaan vain, ettei käyttäjä vahingossa muuntele ohjelmakeskeisiä asetuksia, eikä se siksi tarvitse tarkempia turvatoimenpiteitä kuten salasاناتiedoston kryptausta.

Kuvassa 31 on esitetty Parameters-ohjelman etupaneeli täydennettynä esimerkianturin tiedoilla.

The screenshot shows the 'Kalibrointianturit' (Calibration Sensors) window. It contains the following fields and controls:

- Anturi** (Sensor): A dropdown menu showing 'Testianturi 100 Nm CW'. To its right are two arrow buttons (up and down) and two buttons: 'Lisää anturi' (Add sensor) and 'Poista anturi' (Remove sensor). A 'Kalibroi antureita' (Calibrate sensors) button is located at the top right.
- Valmistaja** (Manufacturer): A text field containing 'Raute Precision Oy'.
- Tyyppi** (Type): A text field containing 'Testianturi 100 Nm CW'.
- Sarjanumero** (Serial number): A text field containing '32123'.
- Kalibrointinumero** (Calibration number): A text field containing 'M-17K123'.
- Nimellisarvo** (Nominal value): A text field containing '100'.
- Suhteellinen maksimivirhe** (Relative maximum error): A text field containing '0,1'.
- Kalibrointilaitteiston mittausepävarmuus (k=2)** (Calibration device measurement uncertainty (k=2)): A text field containing '0,1'.

At the bottom, there is a polynomial equation for torque calculation:

$$M \text{ [N·m]} = 0,000123 + 71 u + 0,000456 u^2 + 0,000789 u^3$$

At the bottom right, there are two buttons: 'OK' (with a green checkmark icon) and 'Peruuta' (with a red X icon).

Kuva 31. Parameters-ohjelman etupaneeli

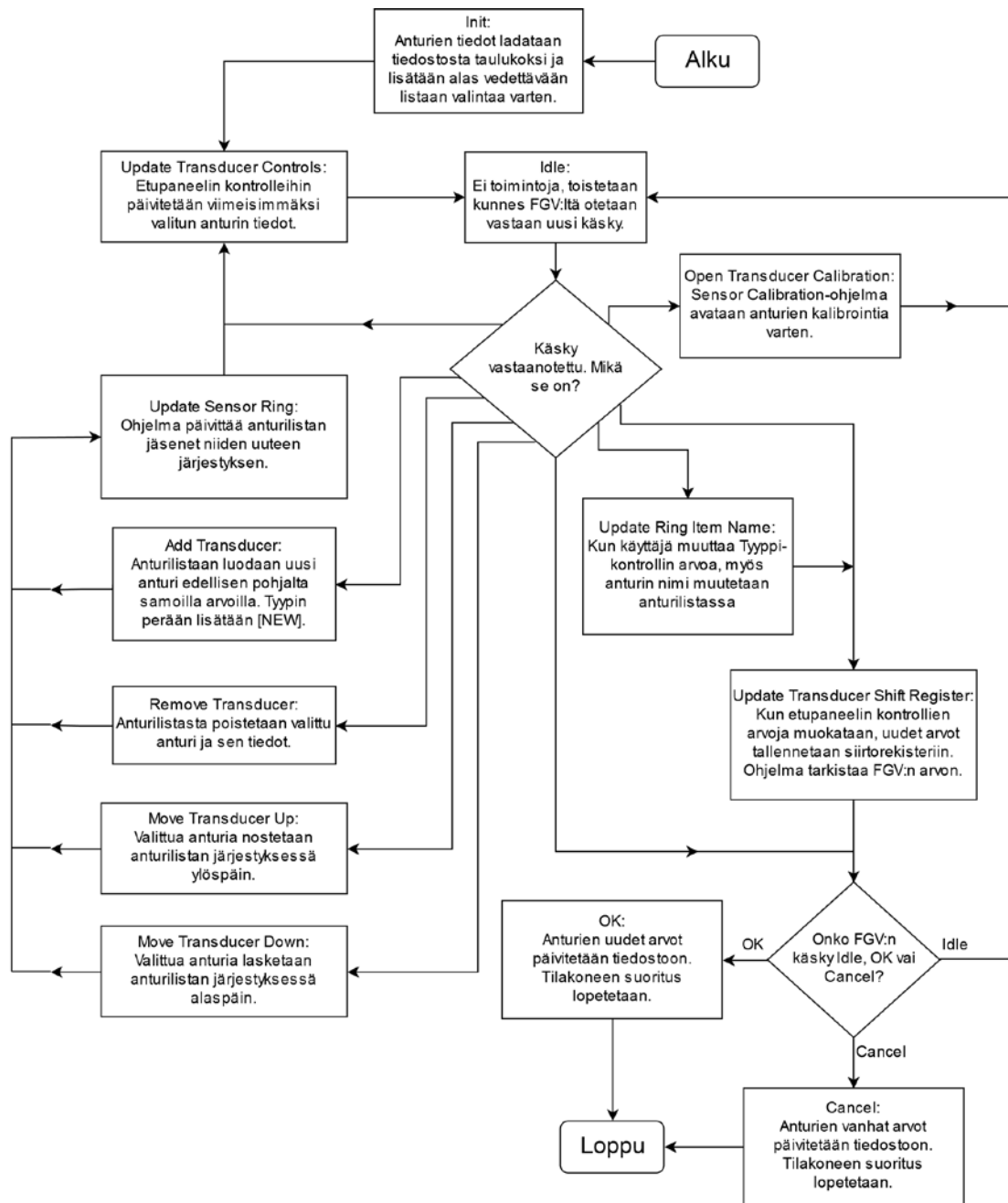
Anturien tiedot ladataan tiedostosta ohjelman sisäiseksi taulukoksi Parameters-ohjelman käynnistyessä. Anturi, jonka tietoja halutaan muuttaa, voidaan valita alas vedettävästä listasta, jonka jäsenten järjestystä voidaan muuttaa nuolinäppäimillä. Tarvittaessa antureita voidaan lisätä tai poistaa 'Lisää anturi' ja 'Poista anturi' -painikkeilla.

Tyyppi-kontrollin arvo toimii anturin nimenä listassa. Ohjelma muuttaa sitä muutettaessa anturin nimeä listassakin. Kun uusi anturi luodaan, käytössä olevan anturin tiedot kopioidaan uuteen anturiin ja tyyppin perään lisätään [NEW] erottamaan anturit toisistaan siihen asti, että käyttäjä antaa uudelle anturille toisen nimen.

OK-painikkeella uudet asetukset tallennetaan anturien tiedostoon vanhojen päälle. Peruuta-painikkeella vanhat asetukset säilytetään ennallaan. Kalibroi antureita -painikkeella

avataan Sensor Calibration -ikkuna, jonka suorituksen ajaksi Parameters-ikkunan suoritus pysäytetään.

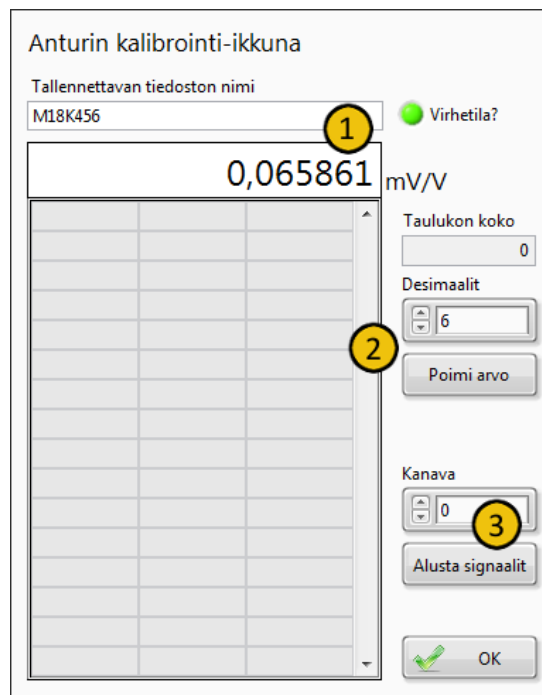
Kuvassa 32 on vuokaavio Parameters-ohjelman tilakoneen toiminnasta. Kun etupaneelin arvoja tai anturilistan ulkomuotoa muutetaan, ohjelma suorittaa Update Transducer Controls ja tarvittaessa myös Update Sensor Ring -tapaukset. Ohjelmalla on myös poikkeuksellinen suorituksen pysäytys: muiden tilakonerakenteiden Property Node -lopetuksen sijaan ohjelma tarkistaa Update Transducer Shift-Register -tapauksessa, onko tapahtumarakenne lähettänyt OK- tai Cancel-käskyn. Jos ei, ohjelma siirtyy takaisin Idle-tapaukseen.



Kuva 32. Vuokaavio Parameters-ohjelman tilakoneen rakenteesta

5.2.6 Sensor Calibration -ohjelma

Sensor Calibration -ohjelma on tarkoitettu vääntömomenttianturien kalibrointiin ja muunnoskaavan muodostamiseen. Ohjelmassa näytteistetään anturin muokkaamatonta signaalia ja kerätään tulokset talteen taulukkoon, josta ne tallennetaan tiedostoon myöhempiä käyttöä varten. Kun Sensor Calibration -ohjelmaa kutsutaan Parameters-ohjelmassa, ennen ohjelman suorittamisen aloitusta ohjelma pyytää tiedoston nimeä, johon tulokset tallennetaan. Jos käyttäjä ei kirjoita mitään, ohjelma käyttää nimeä "default".



Kuva 33. Sensor Calibration -ohjelman etupaneeli

Kuvassa 33 on esitetty Sensor Calibration -ohjelman etupaneeli ohjelman suorituksen alussa. Numeroitujen objektien tehtävät ovat seuraavat:

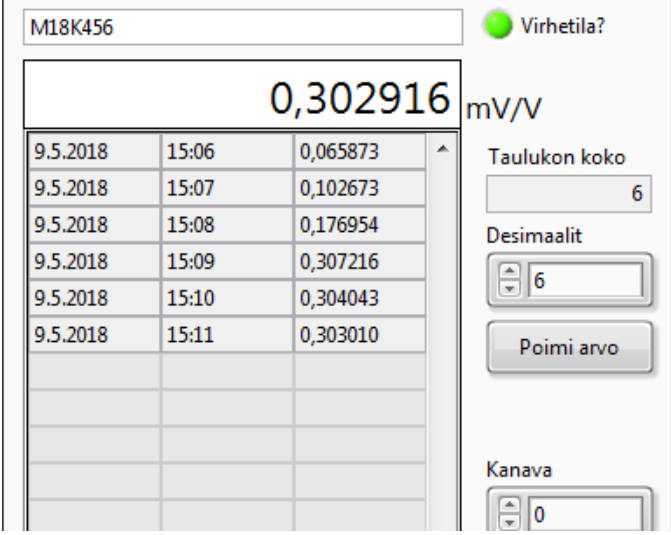
- 1) Tiedoston nimi, signaalin hetkellinen arvo, merkkivalo: Käyttäjä voi asettaa uuden tiedoston nimen näytteiden tallennukselle ohjelman suorituksen ajanakin. Näytteistetyn signaalin viimeisin arvo tulostetaan jatkuvasti indikaattoriin. Merkkivalo palaa vihreänä, kun näytteistys suoriutuu oikein, ja punaisena, kun näytteistyksessä on virhetilanne.
- 2) Taulukko, Taulukon koko -indikaattori, Poimi arvo -painike, Desimaali-kontrolli: Taulukkoon kerätään talteen anturin signaalin arvoja painettaessa Poimi arvo

-painiketta. Taulukon alkioden määrä ilmoitetaan Taulukon koko -indikaattorissa. Näytettävän signaalin arvon desimaalien määrää voidaan muuttaa Desimaali-kontrollilla.

- 3) Kanava-kontrolli, Alusta signaali -painike: Kanavan valinnalla voidaan määritellä vahvistimen näytteistettävä kanava. Alustuspainikkeella vahvistin ja kanavat voidaan alustaa uudelleen. Katso kappale 5.2.1 Main-ohjelma tarkemman tiedon saamiseksi, miten vahvistimen ja signaalin alustus tapahtuu.

Oletuksena ohjelma näytteistää vahvistimelta vääntömomenttianturin muokkaamatonta signaalia. Signaalin viimeisin arvo tulostetaan indikaattoriin, josta se voidaan poimia painamalla Poimi arvo -painiketta. Indikaattorin näytettävien desimaalien määrää voidaan muuttaa Desimaali-kontrollin avulla, mutta tämä ei vaikuta poimitun arvon tarkkuuteen.

Kaikki poimitut arvot kirjataan taulukkoon päivämäärän ja kellonajan kanssa. Uusin taulukko tulostetaan etupaneelille ja tallennetaan käyttäjän nimeämään tiedostoon jokaisen poimimisen yhteydessä. Taulukkoa lasketaan automaattisesti alaspäin näyttämään viimeisin siihen poimittu arvo ja sen alkioden lukumäärä ilmoitetaan Taulukon koko -indikaattorissa. Lisäksi, jos käyttäjä muuttaa tiedoston nimeä kesken arvojen poiminnan, ohjelma luo seuraavan arvon poimimisen yhteydessä uuden tiedoston, johon tallennetaan edelliset ja uudet arvot. Kuvassa 34 on esimerkki etupaneelistä, kun siihen on kerätty näytteitä.



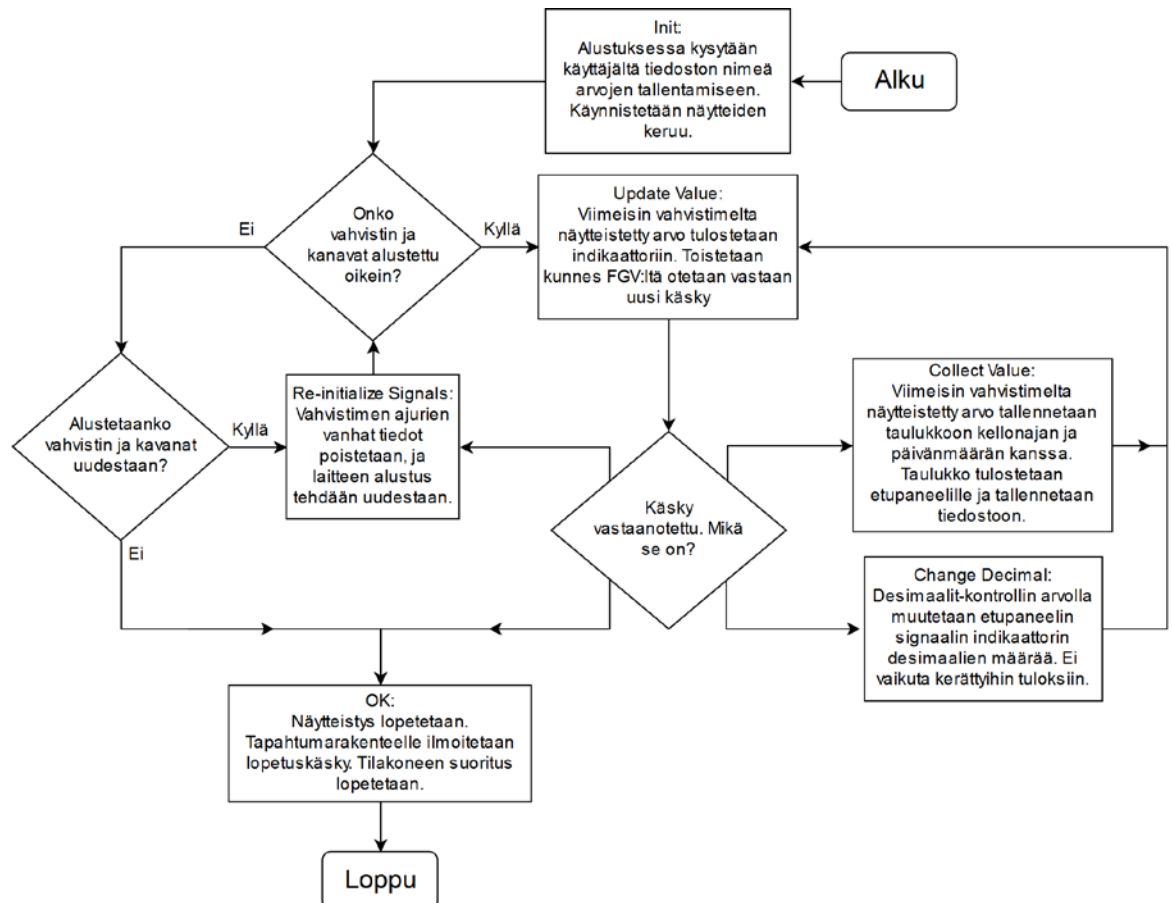
The screenshot shows a software interface for sensor calibration. At the top left, there is a text box containing 'M18K456'. To its right is a green circle icon with the text 'Virhetila?'. Below these, a large digital display shows the value '0,302916' followed by the unit 'mV/V'. Underneath the display is a table with three columns: date, time, and value. The table contains six rows of data, all dated '9.5.2018'. To the right of the table, there are several controls: a 'Taulukon koko' (Table size) control set to '6', a 'Desimaalit' (Decimals) control set to '6', a 'Poimi arvo' (Save value) button, and a 'Kanava' (Channel) control set to '0'.

9.5.2018	15:06	0,065873
9.5.2018	15:07	0,102673
9.5.2018	15:08	0,176954
9.5.2018	15:09	0,307216
9.5.2018	15:10	0,304043
9.5.2018	15:11	0,303010

Kuva 34. Sensor Calibration -etupaneeli poimituilla arvoilla

Kun käyttäjä on saanut tarpeeksi näytteitä, ohjelman suoritus voidaan lopettaa ja luodun tiedoston pohjalta voidaan suorittaa laskutoimenpiteet Excelissä.

Kuvassa 35 on vuokaavio Sensor Calibration -ohjelman tilakoneen rakenteesta. Alustuksen yhteydessä varmistetaan, että vahvistimen ajurit toimivat oikein. Jos niissä havaitaan virhe, käyttäjältä kysytään, haluaako hän yrittää alustaa ajurit uudelleen vai lopettaa ohjelman suorituksen. Tilakoneesta puuttuu myös tavanomainen joutokäynti, vaan sen tilalla toistetaan näytteistystapausta uuden käskyn saamiseen asti.



Kuva 35. Vuokaavio Sensor Calibration -ohjelman tilakoneen rakenteesta

6 OHJELMISTON TESTAUS

6.1 Signaalin tulostuksen ja vääntömomentiksi muuntamisen testaus

Sovellukselle suoritettiin testi, jossa verrattiin sen tulostamaa mV/V signaalia todelliseen mV/V arvoon, joka saatiin referenssilaitteelta vahvistimelle. Tämän jälkeen varmistettiin, että signaalin muunnos vääntömomentiksi muunnoskaavan avulla toimii oikein. Testi ei toiminut laitteen kalibroitina, vaan pelkästään sen toiminnan validointina.

6.1.1 Käytetyt laitteet

Sovellus sai signaalidatan normaaliin tapaan HBM QuantumX MX238B -vahvistimelta. Sille taas luotiin testisignaali HBM BN100 siltakytkentä -kalibrointilaitteen avulla, joka on jännitejakoon perustuva siltakytkentälaite. Sen avulla voidaan tuottaa tunnettuja mV/V arvoja ja simuloida venymäliuska-anturia. Tunnetun käyttö- ja kalibrointihistoriansa vuoksi laitteen asetusarvojen tarkkuuteen voidaan luottaa ja siksi niitä voidaan verrata sovelluksen tulostamiin arvoihin. Poikkeamista voidaan päätellä, onko vahvistimessa ja/tai ohjelmassa merkittäviä virheitä arvojen tulostuksessa ja muunnoskaavan toteutuksessa. BN100 on esitetty kuvassa 36.



Kuva 36. BN100 siltakytkentä -kalibrointilaite

6.1.2 Testin vaiheet

- 1) Muokkaamattoman signaalin keräys: Calibration Settings -ikkunassa kerättiin QuantumX-vahvistimelta BN100-kalibrointilaitteen tuottamia mV/V-signaalin arvoja alkaen nollatasosta. Laitteen asetusarvoa nostettiin 0,1 mV/V välein 2 mV/V arvoon asti, jonka jälkeen se laskettiin vaiheittain takaisin nollatasoon asti. Kutakin arvoa pidettiin yllä 50–60 sekunnin ajan ennen näytteenottoa ja vaihdosta, jotta BN100:n signaali ehtisi tasaantua. Tämän jälkeen sama näytteistys tehtiin nollatasosta -2 mV/V asetusarvoon asti ja takaisin.

Testistä saatiin sovelluksen keräämät mV/V tulokset, joita voitiin verrata BN100:n tuottamaan mV/V arvoihin ja todeta, onko signaali näytteistetty oikein.

- 2) Näytteiden muutos vääntömomenttiarvoiksi: Näytteistetyt mV/V tulokset kerättiin Excel-taulukkoon. Positiivisille arvoille annettiin kuvitteellinen positiivinen vääntömomentin arvo 10 N·m välein 200 N·m asti ja takaisin. Tuloksista ja vääntömomenteista muodostettiin XY-kuvaaja, josta voitiin luoda Excelissä kolmannen asteen muunnoskaava, joka vastaa vääntömomenttiavaimen kääntämistä myötäpäivään. Negatiivisille tuloksille annettiin myös samat positiiviset vääntömomentin arvot, ja niiden XY-kuvaajasta saatiin muunnoskaava, joka vastaa vääntömomenttiavaimen kääntämistä vastapäivään.

Myötäpäiväisen muunnoskaavan kertoimet asetettiin anturitiedostoon Parameters-ikkunassa. Tämän jälkeen Main-ohjelmassa näytteistettiin BN100-kalibrointilaitteen asetusarvoja nollatasosta 0,1 mV/V välein 2 mV/V arvoon asti. Sama tehtiin vastapäiväiselle muunnoskaavalle negatiivisilla mV/V arvoilla.

Ohjelman muunnoskaavoilla saatuja vääntömomentin arvoja verrattiin kuvitteellisiin, odotettuihin vääntömomentin arvoihin, mistä saatiin tietää, onko muunnoskaava toiminut oikein.

6.1.3 Testin tulokset ja arviointi

Calibration Settings -ikkunassa näytteistettiin taulukon 5 ja taulukon 6 tulokset testin ensimmäisessä vaiheessa. HBM-ajurien tuottama lukemat poikkesivat BN100:n antamista arvoista maksimissaan $\pm 52 \cdot 10^{-6}$ verran, joten jännitteen näytteistys toimi oikein ja voitiin siirtyä vaiheeseen 2.

Taulukko 5. Testissä kerätyt positiiviset jännitteet

BN100 asetus- arvo (mV/V)	QuantumX näytteistämä arvo (mV/V)	BN100- ja QuantumX-arvojen erotus ($\times 10^{-6}$ mV/V)
0,0	-0,000019	-19,00
0,1	0,099983	-17,00
0,2	0,199984	-16,00
0,3	0,299987	-13,00
0,4	0,399987	-13,00
0,5	0,499990	-10,00
0,6	0,599992	-8,00
0,7	0,699996	-4,00
0,8	0,799996	-4,00
0,9	0,899996	-4,00
0,0	0,999999	-1,00
1,1	1,100001	1,00
1,2	1,200001	1,00
1,3	1,300003	3,00
1,4	1,400004	4,00
1,5	1,500007	7,00
1,6	1,600008	8,00
1,7	1,700008	8,00
1,8	1,800011	11,00
1,9	1,900015	15,00
2,0	2,000014	14,00
1,9	1,900013	13,00
1,8	1,800011	11,00
1,7	1,700008	8,00
1,6	1,600007	7,00
1,5	1,500005	5,00
1,4	1,400003	3,00
1,3	1,300002	2,00
1,2	1,200002	2,00
1,1	1,100000	0,00
1,0	0,999998	-2,00
0,9	0,899996	-4,00
0,8	0,799993	-7,00
0,7	0,699992	-8,00
0,6	0,599991	-9,00
0,5	0,499991	-9,00
0,4	0,399989	-11,00
0,3	0,299984	-16,00
0,2	0,199984	-16,00,
0,1	0,099981	-19,00
0,0	-0,000020	-20,00

Taulukko 6. Testissä kerätyt negatiiviset jännitteet

BN100 asetus-arvo (mV/V)	QuantumX näytteistämä arvo (mV/V)	BN100- ja QuantumX-arvojen erotus ($\times 10^{-6}$ mV/V)
0,0	-0,000021	-21,00
-0,1	-0,100022	-22,00
-0,2	-0,200024	-24,00
-0,3	-0,300027	-27,00
-0,4	-0,400028	-28,00
-0,5	-0,500029	-29,00
-0,6	-0,600030	-30,00
-0,7	-0,700031	-31,00
-0,8	-0,800034	-34,00
-0,9	-0,900036	-36,00
-1,0	-1,000038	-38,00
-1,1	-1,100039	-39,00
-1,2	-1,200039	-39,00
-1,3	-1,300042	-42,00
-1,4	-1,400040	-40,00
-1,5	-1,500045	-45,00
-1,6	-1,600046	-46,00
-1,7	-1,700048	-48,00
-1,8	-1,800048	-48,00
-1,9	-1,900050	-50,00
-2,0	-2,000052	-52,00
-1,9	-1,900048	-48,00
-1,8	-1,800047	-47,00
-1,7	-1,700047	-47,00
-1,6	-1,600048	-48,00
-1,5	-1,500043	-43,00
-1,4	-1,400043	-43,00
-1,3	-1,300041	-41,00
-1,2	-1,200038	-38,00
-1,1	-1,100037	-37,00
-1,0	-1,000038	-38,00
-0,9	-0,900036	-36,00
-0,8	-0,800033	-33,00
-0,7	-0,700032	-32,00
-0,6	-0,600030	-30,00
-0,5	-0,500028	-28,00
-0,4	-0,400025	-25,00
-0,3	-0,300025	-25,00
-0,2	-0,200023	-23,00
-0,1	-0,100023	-23,00
0,0	-0,000021	-21,00

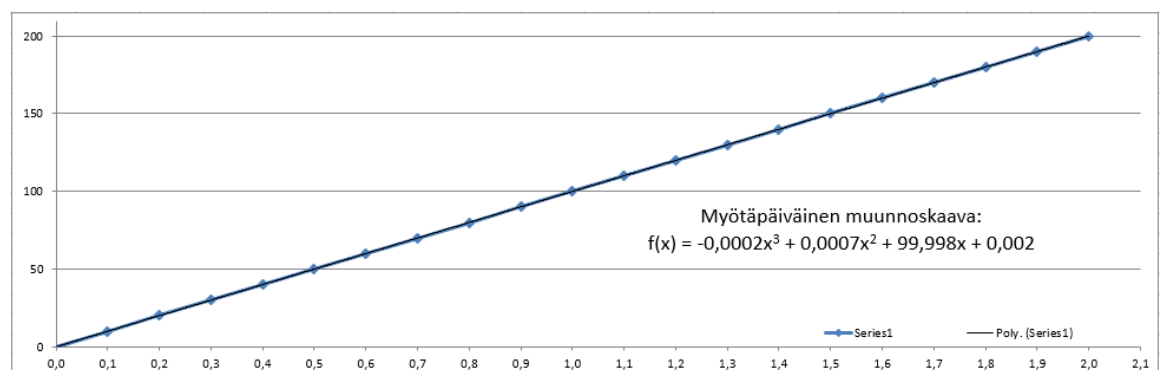
Kuvitteellisesta vääntömomentista ja QuantumX-vahvistimen positiivisista ja negatiivisista näytteistä muodostettiin omat kuvissa 37 ja 38 esitetyt XY-kuvaajat. Koska signaalia näytettiin sekä nousevaan että laskevaan suuntaan, jokaisessa signaalitasossa on kaksi näytettä, jotka sijoittuvat kuvaajassa lähes päällekkäin.

Kuvaajista saatiin muodostettua Excelin avulla kolmannen asteen polynomit, joiden kertoimet tallennettiin anturitietojen muunnoskaavoina. Positiiviselle signaalille muodostui yhtälö

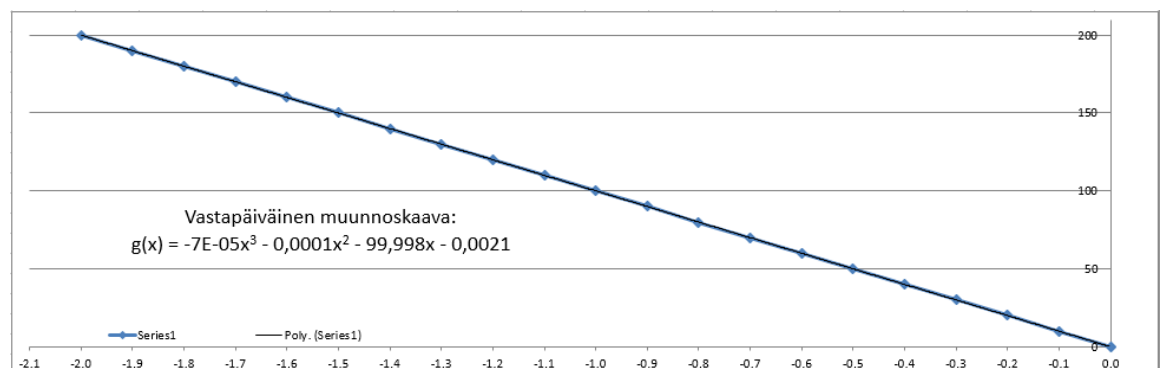
$$f(x) = -0,0002 \cdot x^3 + 0,0007 \cdot x^2 + 99,998 \cdot x + 0,002 \quad (14)$$

ja negatiiviselle signaalille

$$g(x) = -70 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,0001 \cdot x^2 - 99,998 \cdot x - 0,0021 \quad (15)$$



Kuva 37. Positiivisen signaalin polynomin kuvaaja.



Kuva 38. Negatiivisen signaalin polynomin kuvaaja.

Kun Main-ohjelmassa kerättiin HBM-ajurin jännite, joka muunnettiin anturien muunnoskaavoilla vääntömomentiksi, saatiin seuraavan taulukon 7 ja taulukon 8 tulokset. Vastapäiväisen muunnoskaavan $g(x)$ tuloksista kerättiin vain kolme arvoa: nolla-arvo, keskimäinen arvo ja huippuarvo.

Taulukko 7. Kuvitteelliset, odotetut vääntömomentit ja myötäpäiväisen muunnoskaavan $f(x)$ vääntömomentit sekä niiden erotus

BN100 näytämä arvo (mV/V)	Odotettu vääntömomentti (N·m)	Muunnoskaavan $f(x)$ vääntömomentti (N·m)	Poikkeama odotetusta vääntömomentistä ($\times 10^{-6}$ N·m)
0,0	0	-0,000329	329,00
0,1	10	9,999666	334,00
0,2	20	19,999538	462,00
0,3	30	29,999739	261,00
0,4	40	39,999822	178,00
0,5	50	49,999848	152,00
0,6	60	59,999736	264,00
0,7	70	69,999723	277,00
0,8	80	79,999829	171,00
0,9	90	89,999969	310,00
1,0	100	99,999916	84,00
1,1	110	109,999966	34,00
1,2	120	119,999969	31,00
1,3	130	130,000091	-91,00
1,4	140	140,0002	-200,00
1,5	150	150,00015	-150,00
1,6	160	160,000061	-610,00
1,7	170	170,000074	-740,00
1,8	180	180,000105	-105,00
1,9	190	190,00033	-330,00
2,0	200	200,000297	-297,00

Taulukko 8. Kuvitteelliset, odotetut vääntömomentit ja vastapäiväisen muunnoskaavan $g(x)$ vääntömomentit sekä niiden erotus

BN100 näytämä arvo (mV/V)	Odotettu vääntömomentti (N·m)	Muunnoskaavan $g(x)$ vääntömomentti (N·m)	Poikkeama odotetusta vääntömomentistä ($\times 10^{-6}$ N·m)
0,0	0	0,000404	-404,00
-1,0	100	99,999863	137,00
-2,0	200	199,99952	480,00

6.1.4 Päätelmät

QuantumX -vahvistimelta saadut arvot poikkesivat erittäin vähän BN100 kalibrointilaitteen tuloksista, maksimissaan $\pm 52 \cdot 10^{-6}$ mV/V verran. Muunnoskaavoilla saadut vääntömomentit poikkesivat myös hyvin vähän odotetuista arvoista, alle $1 \cdot 10^{-3}$ N·m verran. Osa poikkeamien suuruudesta voitiin selittää signaalin epätasaisesta asettumisesta aiheutuvalla virheellä. Tätä pyrittiin kompensoimaan minuutin mittaisella odotusajalla.

Kun tuloksia verrataan vääntömomenttinormaanin MN06 mittausepävarmuuteen, joka on 0,5 %, voidaan päätellä, että vahvistimelta saatu signaali on tarpeeksi tarkka vääntömomenttiavaimien kalibrointiin ja että vääntömomentin muunnoskaavat lasketaan sovelluksessa oikein.

6.2 Analyysi-aliohjelmien toiminnan testaus ja korjaus

Analyysi-aliohjelman luomisessa oli tärkeää, että sovellus kykenee aina löytämään vääntömomentin mittaustuloksista kuormitusten todelliset huiput ja nollaamaan kaikki sopimatomat arvot. Ohjelman testauksella varmistettiin, ettei lievä kohina, värinä tai käyttäjästä aiheutuvat virheet aiheuta virheittä huipun paikan määrittämisessä.

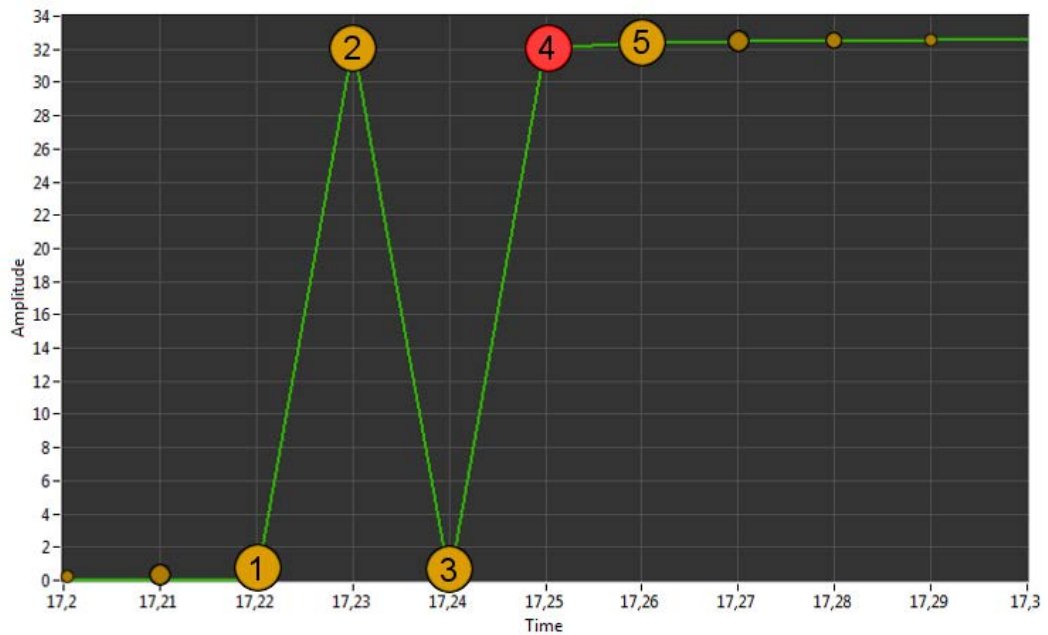
Analyysiohjelman toiminta suunniteltiin tapahtuvaksi kappaleessa 5.2.2 Analyysi-aliohjelmat kuvatussa viidessä vaiheessa, jotta ohjelmasta tulisi helposti muokattava ja se kykenisi systemaattisesti valitsemaan analysoitavasta taulukosta olennaisimmat arvot. Ohjelman kehittämisen aikana kunkin vaiheen toimintaa testattiin sekä sinimuotoisella signaalilla että manuaalisesti etupaneelin kontrollilla generoidulla signaalilla. Paikallista kohinaa simuloitiin ajoittain muuttamalla joitakin vääntömomenttitaulukon alkioden arvoja jälkikäteen ennen analyysia, millä varmistettiin ensisijaisesti analyysin vaiheen 3 ohjelman huippujen löytämisen toimivuus. Analyysi toimi tähän asti näiden testien perusteella ilman virheellisiä tuloksia.

Kun vahvistin saatiin käyttöön, signaali näytteistettiin vääntömomenttianturilta, josta aiheutui myös kohinaa signaaliin. Satunnaiskohinaa koko signaalin alueella paljasti ohjelmointivirheen analyysissa.

Vaiheen 2 ohjelmassa nollataan taulukosta kaikki paitsi alemman raja-arvon tasoiset tai sen ylittävät alkioiden arvot, jolloin kohinaisen signaalin kuvaajaan saattaa jäädä yksittäisiä, muista alkioista erillään olevia arvoja. Vaiheessa 4 nollataan kaikki arvot kuormituksista, jotka eivät sijoitu aikarajojen sisään. Vaiheen toteutuksessa ohjelma oli alun perin jaettu kolmeen tapaukseen, joiden välillä siirryttiin seuraavasti:

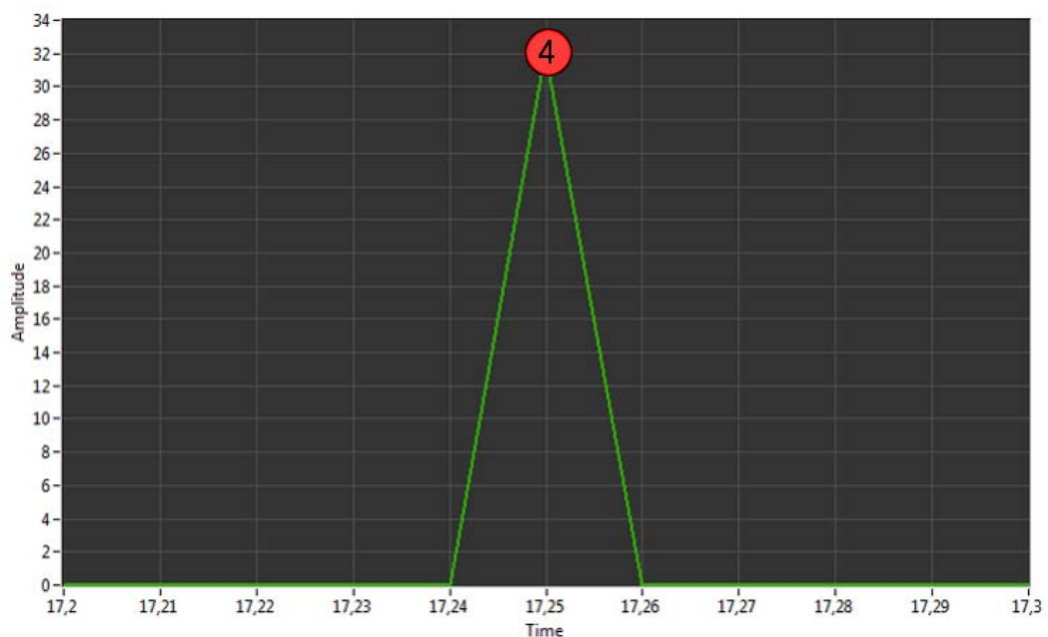
- 1) Onko alkio kuormituksen alku? Jos ei, jatka seuraavaan alkioon. Jos on, merkitse se nollaustaulukkoon. Siirry seuraavaan taulukon alkioon ja ala etsiä kuormituksen loppua.
- 2) Onko alkio kuormituksen loppu (nolla)? Jos ei, merkitse se nollaustaulukkoon ja jatka seuraavaan alkioon. Jos on, siirry seuraavaan taulukon alkioon ja aloita nollausvaiheen suoritus.
- 3) Nollaa merkityt tulokset, jos ne eivät sijoitu aikarajan sisälle. Siirry seuraavaan taulukon alkioon ja aloita ensimmäisen vaiheen kuormituksen alun etsintään.

Koska nollausvaihe oli oma vaiheensa, jossa edettiin seuraavaan taulukon alkioon merkitsemättä senhetkistä alkioita nollattavaksi, ohjelma saattoi ohittaa joidenkin taulukon alkioiden tarkistamisen. Tämän seurauksena analyysin tulokseen saattoi jäädä ylimääräisiä arvoja.



Kuva 39. Vaiheen 2 lähdöstä saatu signaali, virhe tapahtuu alkiossa 4

Kuvassa 39 on havainnollistettu virheen tapahtumista vaiheessa 4. Ohjelma löysi taulukon alkiossa 2 ensimmäisen "kuormituksen" alun ja alkiossa 3 sen lopun. Alkio 2 merkittiin nollattavaksi oikein. Ohjelma jatkoi alkioon 4 suorittamaan nollausvaiheen, jolloin sille jäi tekemättä tarkistustoimenpide kyseiselle alkioille. Ohjelma löysi vasta alkiossa 5 seuraavan kuormituksen "alun", josta nollaustaulukkoon merkitseminen alkoi. Vaiheen lähtönä saadaan kuvassa 40 esitetty kuvaaja, jossa alkio 4 on jätetty virheellisesti poistamatta.



Kuva 40. Vaiheen 4 lähdön signaali, josta on jäänyt poistamatta merkitsemätön arvo

Ohjelman nollausvaihe yhdistettiin kuormituksen lopun etsimisen kanssa, jolloin ohjelma suorittaa arvojen nollauksen välittömästi lopun löydyttyä ja ennen seuraavaan alkioon siirtymistä. Virhe korjaantui, analyysi nollasi sopimattomat arvot ja toimi moitteettomasti vastaisuuden testeissä ja normaalissa käytössä.

6.3 Tilakonerakenteen suorituksen lopettamisen korjaus

Alun perin tilakonerakenteen suorituksen lopettaminen oli suoraviivaisempi kuin nykyisessä toteutuksessa. Kun käyttäjä painoi lopetuspainiketta, tapahtumarakenne lähetti tilakoneelle lopetuskäskyn ja lopetti oman suorituksensa välittömästi samassa tapahtumassa. Ongelmia ei syntynyt niin pitkään, kun tilakone oli ehtinyt siirtymään joutokäyntitapaukseen ennen lopetuskäskyn saapumista, josta se kykeni siirtymään lopetustapaukseen.

Virhe lopetuksen yhteydessä syntyi, jos toinen tapahtuma tehtiin välittömästi ennen lopetustapahtumaa. Jos tapahtumarakenne reagoi kontrollin arvon muuttumiseen samaan aikaan, kun käyttäjä painoi lopetuspainiketta, tapahtumarakenne lähetti kaksi käskyä peräkkäin ja lopetti suorituksensa. Tilakone otti vastaan kontrollin muuttumisen käskyn ja alkoi suorittaa sitä, minkä aikana lopetuskäsky jäi huomioimatta. Tämä johtuu siitä, että FGV:hen asetetaan tilakoneessa aina joutokäyntikäsky ennen siihen siirtymistä, jotta kyseistä tapausta ajettaisiin toistuvasti. Tällöin lopetuskäskyn päälle kirjoitettiin vahingossa joutokäyntikäsky. Tilakone jatkoi suoritustaan, mutta käyttäjä ei voinut asettaa uusia käskyjä ilman tapahtumarakennetta, jolloin ohjelman suoritusta ei voitu lopettaa ja se jäi jumiin.

Results Screen -ohjelmassa ongelma korjattiin koodilla, joka tarkistaa ennen joutokäyntiin siirtymistä, onko tapahtumarakenne lähettänyt lopetuskäskyä, ja suorittaa siinä tapauksessa tämän käskyn. Toteutuksen ongelmana oli, että se olisi mahdollisesti monimutkistanut koodin havainnollisuutta ja muokattavuutta muissa tilakoneissa.

Muiden ohjelmien tilakoneisiin toteutettiin kappaleessa 5.1.2 tarkemmin selitetty Property Nodella tapahtuva lopetusmenetelmä. Jos tilakone toista käskyä suorittaessaan ei huomaa lopetuskäskyä, tapahtumarakenne ei suorita omaa lopetustapahtumaa myöskään. Ohjelman jumiutuminen korjaantui.

6.4 Toiminnan testaus ulkopuolisella testihenkilöllä

Sovellusta testattiin antamalla käyttäjän, jolla ei ollut aikaisempaa tietoa opinnäytetyön kalibrointisovelluksen käytöstä, suorittaa normaali vääntömomenttiavaimen kalibrointi alusta loppuun. Kalibrointiasetusten muodostus, tulosten keräys, analysointi ja käsittely sekä kalibrointitodistuksen luominen toimivat ilman ongelmia. Anturien asetusten muokaus Parameters-ohjelmassa ja anturien kalibrointi Sensor Calibration -ohjelmassa toimivat myös oikein. Toiminnasta ei siis löytynyt maininnan arvoisia korjattavia vikoja.

Palautteena ohjelman ulkoasua ja tekstiä muokattiin miellyttävämmäksi. Settings-ohjelmaan lisättiin toiminto, jolla mittapisteitä voitiin lisätä prosenttiosuutena vääntömomenttiavaimen nimellisarvosta. Calibration Settings -ohjelmaan toivottiin myöhemmin lisättäväksi ajastustoiminto, joka ilmoittaa äänimerkillä käyttäjälle, milloin seuraava näyte tulee ottaa. Tämä toiminto on mahdollista toteuttaa jatkokehityksessä.

7 TULOSTEN TARKASTELU

Luvussa 4 on lueteltu kaikki vääntömomenttiavaimien kalibrointisovelluksen vaatimukset. Oleellimmat olivat kuitenkin seuraavat: sovelluksen tuli kyetä suorittamaan vääntömomenttiavaimien kalibroinnin uusimman standardin ISO 6789:2017 vaatimusten mukaan. Sovelluksen tuli olla myös modulaarinen ja laajennettavissa oleva sekä kykenevä käsittelemään virhetilanteita kaatumatta tai kalibrointia muuten keskeyttämättä.

Opinnäytetyön tuloksena saadulla kalibrointisovelluksella kyetään suorittamaan kalibrointi vääntömomenttiavaimelle edellä mainitun ISO-standardin vaatimusten mukaan SI-järjestelmän yksiköillä: sovellus kykenee näytteistämään anturien signaalin ja muuttamaan sen vääntömomentiksi tulosten käsittelyä varten ja luomaan tulosten ja asetusten pohjalta lopullisen kalibrointitodistuksen. Näytteistyksessä ja sovelluksen muussa normaalissa käytössä virhetilanteet eivät kaada ohjelmaa ja vahvistimen virheellinen toiminta kyetään korjaamaan ohjelman ajon aikana. Modulaarisuuden ylläpitämiseksi tilakonerakenteen tapauksiin pyrittiin luomaan aliohjelmia toiminnoille, jotka toistuivat ohjelmissa usein ja jotka olivat rakenteeltaan monimutkaisimpia.

Vaikka mahdolliset jäljelle jääneet virheet tulevat esille myös sovelluksen käytön aikana, jatkokehityksessä virhetilojen etsintää, korjaamista ja niihin varautumista voidaan edelleen jatkaa. Vaikka aliohjelmia on luotu koodin eri osissa toistuville ja monimutkaisimmille toiminnoille, niitä voidaan edelleen tarpeen vaatiessa lisätä muihin sovelluksen tapauksiin, joissa ne selventävät koodin tarkastelua. Kalibrointitodistuksen luomiseen käytetty aliohjelma ei kyennyt uudelleennimeämään kalibrointitodistusta, jonka takia käyttäjä joutuu tekemään sen Excelissä manuaalisesti. Automaattinen todistuksen nimeäminen voidaan toteuttaa jatkokehityksessä.

Tilakonerakenteen suorituksen lopettaminen tapahtuu tällä hetkellä Property Noden avulla. Niiden käyttö on yleisesti kuitenkin epäsuositeltua, jos muita ratkaisuja on saatavilla. Nykyisen Property Node -ratkaisun tilalle voisi jatkokehityksessä kehittää muita menetelmiä, kuten käskyjen ketjuttamisen FGV:ssä tai nykyisen Results Screen -ohjelman tarkistustoimenpiteen paranneltu versio.

Muita ominaisuuksia, joita sovellukseen voi lisätä jatkokehityksessä: sovelluksessa käytettävien vakiodien arvot ladattaisiin niiden sijaan tiedostoista, joiden arvoja kyettäisiin muuttamaan Parameters-ohjelmassa. Tällöin sovellusta ei tarvitsisi koodata uudestaan vain pienien muutosten aikaansaamiseksi. Sensor Calibration -ohjelmaan tulee lisätä

ajastin, joka ilmoittaa käyttäjälle äänimerkin kanssa, milloin kalibrointianturin kalibroinnissa tulee poimia näyte. Main-ohjelman kuvaajat voitaisiin tallentaa tiedostoon, josta ne voidaan ladata siinä tapauksessa, että sovellus tai tietokone kaatuu tai sammuu yllättäen kalibrointitoimenpiteen aikana. Samalla voidaan lisätä kuvaajan nollaus -ominaisuus, jotta seuraavan vääntömomenttiavaimen kalibrointi voidaan aloittaa ilman vanhaa kuvaajaa tarvitsematta sulkea sovellusta kalibrointikertojen välillä.

8 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön aiheena oli luoda Mittaustekniikan keskukselle MIKESille uusi vääntömomenttiavainten kalibrointisovellus, joka kykeni toteuttamaan uuden vääntömomenttiavaimien kalibrointistandardin ISO 6789:2017 vaatimukset. Sovelluksen tuli olla modulaarinen ja laajennettavissa oleva sekä kyetä käsittelemään virhetilanteita kaatamalla.

Sovellus toteutettiin LabVIEW ohjelmointiympäristössä. LabVIEW mahdollisti ohjelmien luomisessa tapahtumaohjatun tilakonerakenteen, joka on modulaarinen ratkaisu ohjelmien kehitykseen. Sovelluksen toiminnot, kuten mm. asetusten määrittäminen, kalibroinnin suoritus ja tulosten tarkastelu, on jaettu omiin ohjelmiin, jotka hyödyntävät tilakonerakennetta. Yhden kerran suoriutuvat, monimutkaiset tai toistuvat toiminnot luotiin aliohjelmina modulaarisuuden ylläpitämiseksi.

Valmiiksi saadulla kalibrointisovelluksella voidaan suorittaa kaikki kalibroinnin vaatimat vaiheet: käyttäjä kykenee asettamaan, lataamaan ja tallentamaan haluamansa kalibrointiasetukset. Asetusten pohjalta voidaan suorittaa mitta- ja testipisteiden avulla vääntömomenttiavaimen kalibrointi, josta saadaan tuloksena vääntömomentin kuvaaja. Kuvaajalle voidaan suorittaa ohjelmallisesti analyysi, jonka tuloksista ja asetetuista kalibrointiasetuksista luodaan kalibrointitodistus.

Ohjelman osien toimivuutta testattiin jatkuvasti sen kehityksen ohessa, minkä aikana suurin osa löydettyistä virhetilanteista löydettiin. Valmiin ohjelman toimivuus validoitiin myös ulkoisen kalibroinnissa käytettävän siltakytkentälaitteen ja ulkopuolisen käyttäjän avulla. Löydetty virhetilanteet saatiin joko korjattua tai ohjelma kykenee käsittelemään ja ilmoittamaan niistä käyttäjälle niiden tapahtuessa.

Jatkokehityksessä ohjelmalle voidaan lisätä uusia ominaisuuksia, joilla parannetaan käytettävyyttä. Tärkeimpinä on kyky tallentaa, ladata ja/tai nollata kalibrointikerran tulokset, jotta käyttäjä voi joko jatkaa edellistä kalibrointia sovelluksen kaatumisvaiheessa tai aloittaa uuden tyhjältä pohjalta, sekä kyky muokata sovelluksen sisäisiä asetuksia ja arvoja sovelluksella itsellään.

Valmis opinnäytetyön vääntömomenttiavaimien kalibrointisovellus täytti siis kaikki työnantajan määräämät minimivaatimukset.

LÄHTEET

1. <http://www.mikes.fi/tietoa-meistä>
2. <http://www.mikes.fi/palvelut-yrityksille/kalibrointipalvelut>
3. <http://www.mikes.fi/yhteystiedot/mikes-kajaani-toimipisteen-esittely>
4. <http://www.mikes.fi/mittayksiköt/jäljitettävyyys>
5. SI-opas, 2002, Suomen Standardoimisliitto SFS
6. https://fi.wikipedia.org/wiki/Kansainvälinen_yksikköjärjestelmä
7. Suomen standardisoimisliitto SFS, 2010, SFS opas 99
8. Pentti Inkinen, Jukka Tuohi, 1999, Momentti 1 Insinöörifysiikka, Otava, ISBN-13
9. <http://www.ruuvihankinta.fi/tekniset.html>
10. <https://www.bahco.com/fi-fi/p/electronic-torque-wrenchreversible-ratchet-head/47-b7-cb-96-2d-ac-53-1d-6e-09-36-f9-a5-f0-c6-97/>
11. <http://www.motonet.fi/fi/tuote/765073/Bahco-IZO-D-30-digitaalinen-momenttiavain-3-30-Nm-14>
12. Stephanie Bell, A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement, 1999, ISSN 1368-6550
13. <http://www.mikes.fi/mittayksiköt/si-mittayksiköt-suomen-järjestelmä/massa>
14. M3003 The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement, 2012, UKAS
15. JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement, 2008, JCGM
16. <https://www.iso.org/members.html>
17. Thomas J. Bress, 2006, Effective LabVIEW Programming, NTS Press, ISBN-10 1-934891-08-8, ISBN-13 978-1-934891-08-7